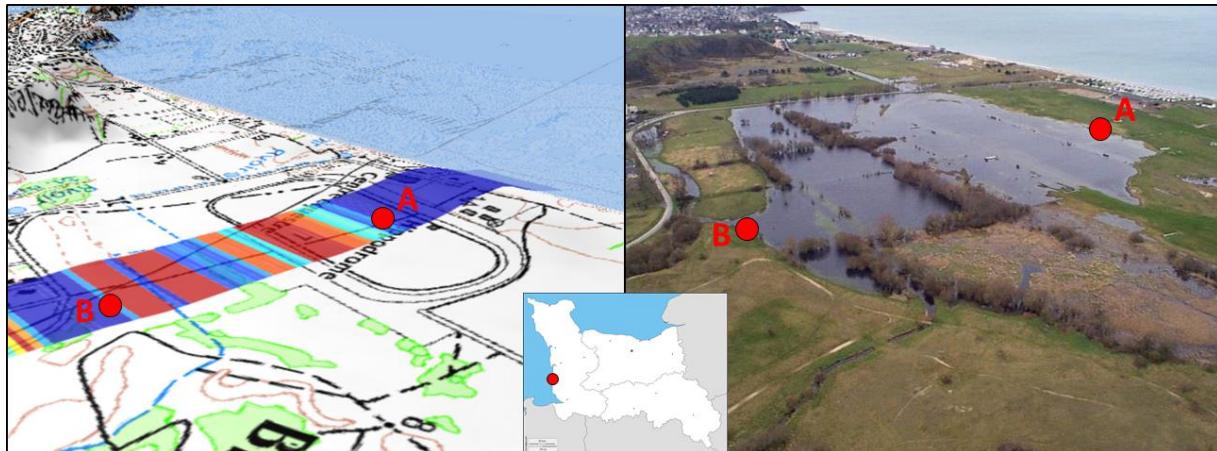


Impact des variations climatiques sur la vulnérabilité aux débordements de nappe des zones côtières du Cotentin

Rapport final

A. Gauvain¹, T. Babey², L. Aquilina³, J.-R. de Dreuzy⁴, F. Gresselin⁵ et A. Louf⁵

Novembre 2017



Sensibilité aux débordements de nappe prédicta par modélisation (gauche, rouge : très sensible ; bleu foncé : peu sensible) et photographie aérienne de l'inondation de 2001 (droite), secteur de Bréville-sur-Mer (Manche).

¹Ingénieur d'études, OSUR, Géosciences Rennes – ²Docteur en hydrogéologie, OSUR, Géosciences Rennes

³Professeur, Université Rennes 1 – ⁴Directeur de recherche, CNRS – ⁵DREAL Normandie

Résumé

Les inondations par débordement de nappe sont un problème récurrent sur la côte Ouest de la Normandie. La menace liée aux changements climatiques d'une augmentation de la fréquence et de l'étendue de ces inondations, notamment due à l'élévation du niveau marin, soulève de réels enjeux pour l'aménagement et la gestion future du territoire. L'étude faisant l'objet de ce rapport est menée en collaboration entre la DREAL Normandie et l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes. Son objectif est d'identifier les processus contrôlant ces phénomènes d'inondations côtières grâce à un outil de modélisation hydrogéologique, la DREAL et l'OSUR apportant respectivement la connaissance du territoire et des compétences en modélisation. L'étude utilise de deux types de modèles : (1) des modèles analytiques où l'on contrôle l'ensemble des paramètres et qui permettent de comprendre les processus mis en jeu sur des cas simples et (2) des modèles numériques réalisés via un logiciel open-source (MODFLOW, distribué par l'USGS) permettant de modéliser des cas précis plus complexes. Un site d'étude de référence, le site de Bréville-sur-Mer (Manche), a été retenu pour sa sensibilité avérée aux inondations par débordement de nappe, et pour sa configuration géomorphologique fréquemment rencontrée le long des côtes de la Manche.

L'étude a montré que les variations du niveau de la nappe phréatique côtière dues à la marée ne se propagent pas au-delà de quelques centaines de mètres depuis la mer. En revanche, une augmentation du niveau marin moyen, induite par le changement climatique, pourrait se traduire par une augmentation globale du niveau de la nappe côtière se propageant à plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. La présence de drains arrières-littoraux limite cette propagation et protège les territoires continentaux à l'amont hydrologique, à condition que ces drains ne soient pas mis en charge par une connexion maritime. Ces drains constituent en revanche des zones de vulnérabilité élevée, puisque sous la double influence de la mer et de la décharge des nappes.

La diffusivité du milieu souterrain apparaît comme le facteur de contrôle critique d'un territoire comme Bréville-sur-Mer. Elle contrôle d'une part la propagation des variations maritimes dans l'aquifère ainsi que la capacité de celui-ci à se vidanger après une période de recharge importante. Elle est d'autre part mal connue du fait d'un nombre limité de mesures. Une meilleure détermination de cette diffusivité constituera un préalable indispensable à la réalisation de modèles calibrés prédictifs de l'aléa hydrogéologique. Ces modèles devront également prendre en compte des processus non étudiés ici comme les effets de pointe ou d'anse, l'influence de la connectivité des drains arrière-littoraux avec l'océan, ainsi que les phénomènes de salinisation.

Table des matières

1. INTRODUCTION	5
2. SITE D'ETUDE : BREVILLE-SUR-MER	7
2.1 PRESENTATION DU SITE D'ETUDE	7
2.2 DESCRIPTION DU MODELE.....	8
2.2.1 <i>Equations et processus</i>	8
2.2.2 <i>Méthodes de résolution numérique</i>	9
2.2.3 <i>Logigramme et interfaces</i>	9
3. LES MAREES ET LEUR INFLUENCE.....	10
3.1 COMPOSANTES DE L'ONDE DE MAREE.....	10
3.2 PROPAGATION DE L'ONDE DE MAREE	11
3.3 RESULTATS.....	12
3.3.1 <i>Impact de la composante semi-mensuelle</i>	12
3.3.2 <i>Impact de la composante journalière</i>	14
3.4 INTERPRETATION DES RESULTATS	14
4. L'AUGMENTATION DU NIVEAU MARIN ET SON INFLUENCE	17
4.1 PREDICTIONS DE L'AUGMENTATION DU NIVEAU MARIN.....	17
4.2 AUGMENTATION DU NIVEAU MARIN : SOLUTION ANALYTIQUE	18
4.3 RESULTATS.....	18
4.4 INTERPRETATION DES RESULTATS	21
5. LES VARIATIONS METEOROLOGIQUES ET LEURS IMPACTS	22
5.1 VITESSE DE VIDANGE D'UNE DUNE APRES UN EVENEMENT PLUVIEUX	22
5.1.1 <i>Approximation analytique</i>	22
5.1.2 <i>Résultats</i>	22
5.1.3 <i>Interprétation des résultats</i>	24
5.2 EFFET METEOROLOGIQUE SUR LE MODELE DE BREVILLE-SUR-MER	24
5.3 DIRECTIONS, TEMPS DE CIRCULATION ET EXUTOIRES DES ECOULEMENTS	27
6. DISCUSSION.....	29
6.1 CALIBRATION DE LA DIFFUSIVITE	29
6.2 IMPACT DE LA MARITIMISATION D'UN DRAIN ARRIERE-LITTORAL	30
6.2.1 <i>Niveau moyen actuel</i>	31
6.2.2 <i>Propagation de l'onde de marée</i>	32
6.2.3 <i>Propagation d'une augmentation du niveau marin moyen</i>	33
7. CONCLUSION	35
8. REFERENCES	37
9. ANNEXE	42
9.1 CALCUL ANALYTIQUE DE LA VIDANGE D'UNE DUNE.....	42
9.2 CALCUL ANALYTIQUE DE LA PROPAGATION DU NIVEAU MARIN MOYEN	45
9.3 GUIDE D'UTILISATION DU MODELE DE BREVILLE-SUR-MER	46
9.3.1 <i>Installation des logiciels</i>	46
9.3.1.1 Installation de QGIS	46
9.3.1.2 Installation du plugin FREEWAT	46
9.3.2 <i>Accéder au plugin FREEWAT</i>	48

9.3.3	<i>Utilisation du modèle de Bréville-sur-Mer.....</i>	49
9.3.3.1	Ouverture du projet QGIS	49
9.3.3.2	Mettre à jour le chemin de dossier du modèle	50
9.3.3.3	Mettre à jour le chemin de dossier vers MODFLOW.....	51
9.3.3.4	Réaliser une simulation avec FREEWAT	51
9.3.3.5	Exploiter les résultats de simulation FREEWAT	53

1. Introduction

Au cours de l'hiver 2000-2001, la côte Ouest de la Normandie a été touchée par des inondations de longue durée liées à des débordements de nappes phréatiques. Face à l'ampleur et au coût des dommages, notamment autour de Caen, la DREAL de Normandie a lancé dès 2001 un vaste programme d'acquisition de connaissances sur ce risque qui s'est conclu en 2007 par la publication d'un atlas cartographique régional des risques à l'échelle 1/25 000. Cette cartographie est actuellement en révision le long des côtes de la Manche (exemple en Figure 1), là où les connaissances ont fortement progressé depuis 2007 et où l'élévation du niveau marin risque à terme d'entraîner une augmentation de l'aléa hydrologique. En effet, les écoulements souterrains dans les parties basses du littoral normand sont, comme les écoulements fluviaires, contraints par la dynamique des marées et le niveau marin.

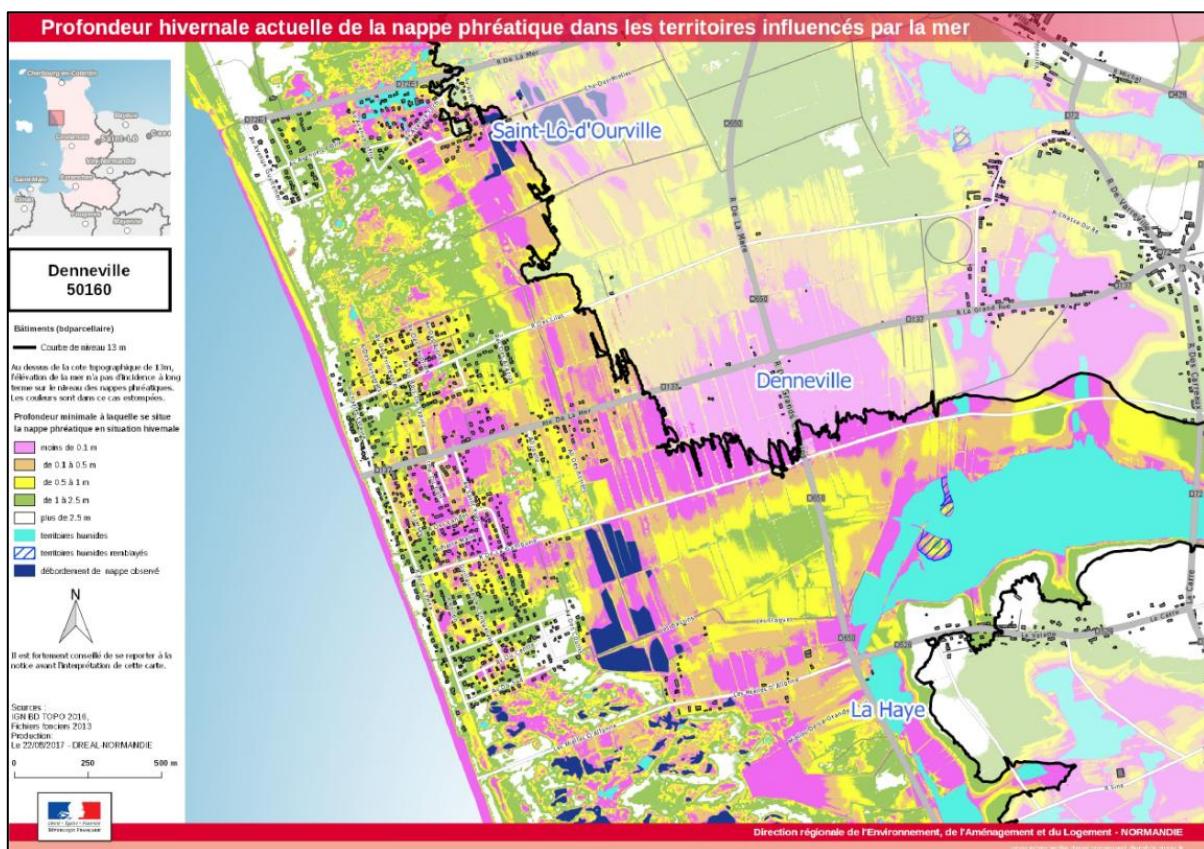


Figure 1 - Carte de profondeur du toit de nappe phréatique produite par la DREAL Normandie sur la zone de Denneville (Manche). Les zones en rose correspondent à une profondeur de moins de 10cm.

Dans le cadre de cette révision et de l'appui technique qu'elle offre aux territoires et à leurs porteurs de projets, la DREAL a souhaité acquérir des informations à caractère méthodologique sur l'impact qu'aura l'élévation de la mer sur les écoulements souterrains dans la bande côtière. Elle a sollicité pour cela l'appui de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR, Université de Rennes), et plus précisément de l'équipe Eau et Transferts dans les Milieux Naturels, pour la réalisation d'une étude visant à identifier les

facteurs clefs qui interviennent dans la genèse de l'aléa hydrologique, afin de prévoir l'évolution future de ce dernier.

Les inondations survenant le long des littoraux de l'Ouest de la France ont différentes causes : la submersion marine directe, le débordement des fleuves côtiers et le débordement des nappes phréatiques. Pour les nappes phréatiques, les risques associés sont contrôlés par différents facteurs météorologiques, marins, géologiques et hydrologiques où la saturation et la capacité de désaturation des milieux jouent un rôle important. En bordure de mer, cette saturation vient de l'évacuation des eaux qui se sont infiltrées dans les nappes et des variations du niveau marin. Une saturation importante limite la capacité d'infiltration et augmente la vulnérabilité face aux événements pluvieux et spécialement dans les périodes de grandes marées ou si le niveau des mers monte.

Les objectifs de ce projet collaboratif entre la DREAL et l'OSUR sont de :

- progresser sur la compréhension des scénarios et la connaissance des facteurs de risque de débordement de nappe le long des littoraux du Cotentin ;
- proposer un classement relatif des facteurs de contrôle du risque et éventuellement des indicateurs de risque simples et évaluables sur le trait de côte à l'échelle régionale ;
- proposer un cadre d'analyse des impacts liés à l'évolution du niveau de la mer à moyen et long terme dans les 20 à 80 années à venir.

Dans le souci de construire en commun cette problématique, et d'en tirer le plus grand nombre de bénéfices pour leurs objectifs respectifs, la DREAL et l'OSUR se sont accordés pour que les modélisations portent sur un cas concret préalablement choisi et analysé sur le terrain. Le site retenu est le celui de Bréville-sur-Mer, au nord de Granville (Manche). Ce site a été choisi en raison d'une part de sa sensibilité connue aux inondations par débordement de nappe, et d'autre part de sa configuration géologique et topographique, fréquemment rencontrée le long de la côte ouest du Cotentin. Différents facteurs de contrôle de l'aléa hydrologique seront ainsi analysés : le signal de marée, la diffusivité du milieu géologique, l'élévation de la mer en réponse au changement climatique et les variations de précipitations.

2. Site d'étude : Bréville-sur-Mer

2.1 Présentation du site d'étude

Pour déterminer l'impact des variations maritimes sur l'inondabilité des zones côtières, l'étude s'est portée sur le site de Bréville-sur-Mer (Figure 2). Ce site présente une vulnérabilité connue aux débordements de nappes phréatiques, illustrée par exemple lors des inondations de l'hiver 2000-2001 cartographiées par la DREAL Normandie. La configuration topologique et géologique de ce site est de plus caractéristique d'un grand nombre de territoires le long de la côte Ouest du Cotentin.

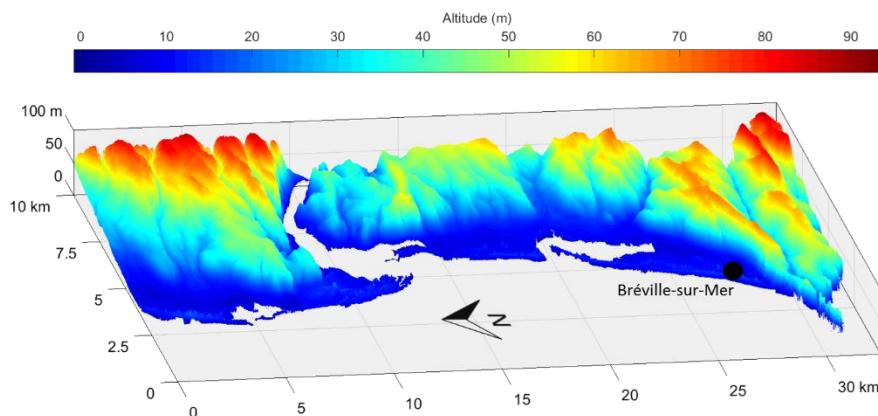


Figure 2 – Modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 5m de la côte depuis Granville (au sud) à Agon-Coutainville (au nord). La position du site de Bréville-sur-Mer est repérée par une pastille noire. Source : [IGN](#).

Le site de Bréville est caractérisé par la présence d'un cordon dunaire actuel (en jaune, Figure 3), d'un cordon dunaire fossile (en bistre moucheté), plaqué contre la paléofalaise et, constituant cette dernière, de schistes et grès briovériens (en vert) plus ou moins colluvionnés.

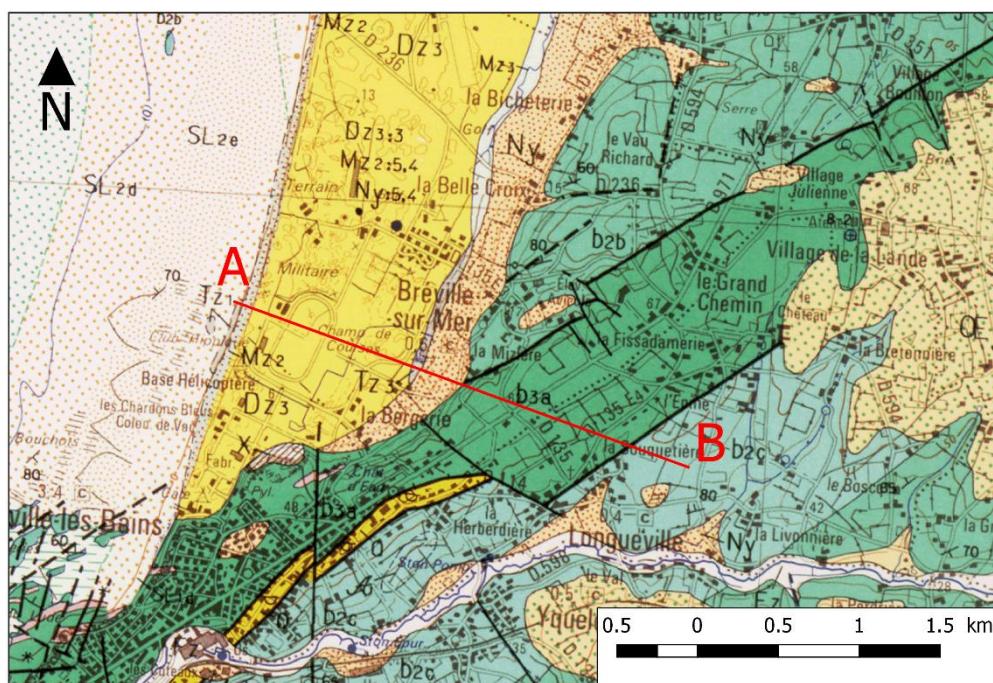


Figure 3- Carte géologique de la zone de Bréville-sur-Mer [Doré and Bignot, 1987]. Le modèle sera établi le long du segment A-B (en rouge).

Les sables dunaires actuels ou fossiles, fins et bien triés, emballent de manière sporadique des colluvions isolés ou en amas (des blocs de head), voire des remblais. Le cordon dunaire, surélevé côté mer, s'abaisse vers l'Est, protégeant des influences marines les points bas du territoire. Ces derniers se localisent au niveau du lieu-dit la Bergerie à partir duquel prend naissance un petit cours d'eau, coulant vers le Nord. Son tracé est souligné par la présence d'alluvions sur la carte (en gris). Les parties basses des cordons dunaires actuel et fossile sont humides. Les zones humides sont régulièrement inondées en hiver (Figure 4).



Figure 4 - Photographie aérienne de l'inondation de l'hippodrome de Bréville-sur-Mer, hiver 2000-2001.
Source : DREAL Normandie.

Les modèles développés dans cette étude ont pour objectif de cerner les facteurs participant à la dynamique de saturation / désaturation du milieu naturel du site de Bréville-sur-Mer, le long de la coupe A-B de la Figure 3.

2.2 Description du modèle

2.2.1 Equations et processus

Le mouvement en trois dimensions d'une eau de densité constante au travers d'un milieu géologique poreux peut être décrit par l'équation différentielle générale suivante :

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h) + W \quad (1)$$

où h est la charge hydraulique, t est le temps, S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique, K est le tenseur des perméabilités et W est le terme source. Pour le site de Bréville-sur-Mer, nous considérons une application spécifique de l'équation (1) où la perméabilité de l'aquifère est homogène et où la recharge par les précipitations R constitue le seul terme source. L'équation (1) se simplifie ainsi :

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = K \nabla^2 h + R. \quad (2)$$

En plus de la recharge, les modèles sont contraints à leur extrémité Ouest par le niveau de la mer, qui constitue une charge imposée variable dans le temps $h_{mer}(t)$:

$$h(x = 0, t) = h_{mer}(t) \quad (3)$$

où x est la distance à la mer. A l'extrême Est du modèle ($x = L$), le modèle est contraint par une limite imperméable :

$$q(x = L, t) = 0 \quad (4)$$

où q est le flux d'eau, relié à la charge hydraulique h par la loi de Darcy :

$$q = -K\nabla h. \quad (5)$$

2.2.2 Méthodes de résolution numérique

Sauf pour des cas très simplifiés, dont certains seront développés à des fins de comparaison dans cette étude, il n'existe pas de solution analytique à l'équation (2). Pour des cas complexes comme celui de Bréville-sur-Mer, des méthodes de résolution numériques doivent être employées pour obtenir des solutions approchées. Nous utilisons ici le logiciel de simulation hydrogéologique MODFLOW 2005 [Harbaugh, 2005]. MODFLOW est un logiciel open-source distribué par l'USGS (United States Geological Survey) très largement utilisé en hydrogéologie. MODFLOW utilise une méthode de différences finies avec une résolution combinant algèbre matriciel et solutions itératives.

2.2.3 Logigramme et interfaces

De nombreuses interfaces utilisateur, libres ou non, ont été développées pour MODFLOW. Nous utilisons l'interface open-source FREEWAT, développée par une équipe de recherche italienne [De Filippis, 2017]. FREEWAT constitue un plugin du logiciel QGIS [QGIS Development Team, 2009], qui est un logiciel libre de SIG (Système d'Information Géographique) permettant notamment d'exploiter les cartographies et modèles numériques de terrain (MNT) mis à disposition par la DREAL et l'IGN. Le logigramme des différents logiciels utilisés est synthétisé dans la Figure 5.

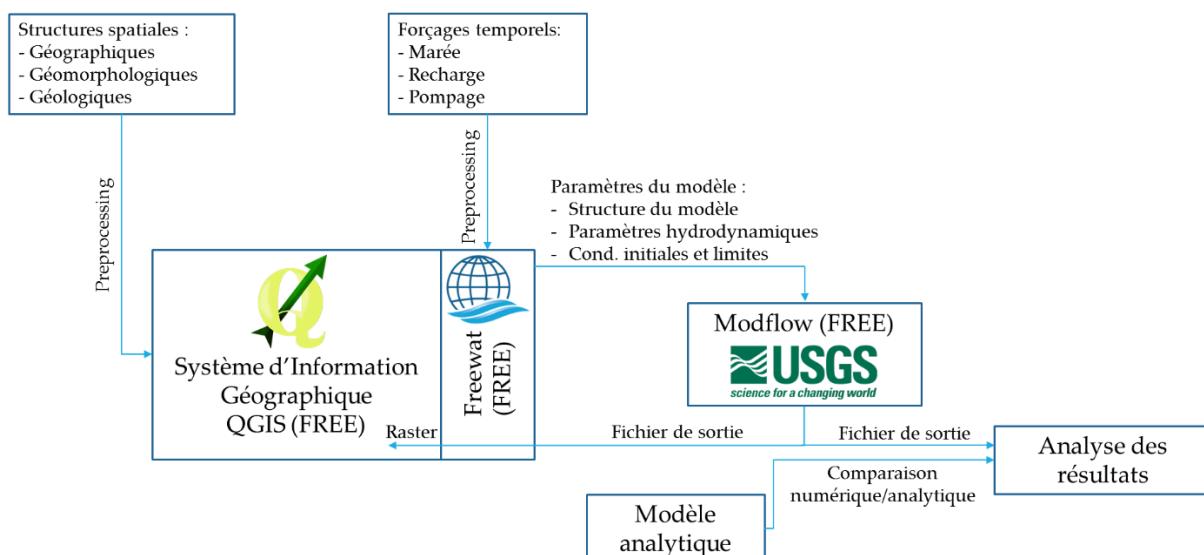


Figure 5 – Organisation des logiciels utilisés dans la conception des modèles hydrologiques de Bréville-sur-Mer.

3. Les marées et leur influence

3.1 Composantes de l'onde de marée

Le signal de marée est composé d'un grand nombre d'harmoniques qui ont une influence plus ou moins importante sur le signal global de la marée [Schureman *et al.*, 1971]. Le signal disponible le plus proche de notre zone d'étude est donné par le marégraphe de Diélette (Figure 6). Sur ce marégraphe, le signal observé est de type semi-diurne et est composé principalement des harmoniques suivantes (de l'ordre de 80 à 90% du signal total de marée [SHOM, 2016]) :

- Composante continue ou la hauteur d'eau moyenne (en violet) ;
- Composante semi-diurne (en bleu) de période $T_3=12\text{h}25\text{ min}$;
- Composante semi-mensuelle (en orange) de période $T_1= (29.53) / 2=14.76$ jours ;
- Composante mensuelle (en jaune) de période $T_2=27.7$ jours.

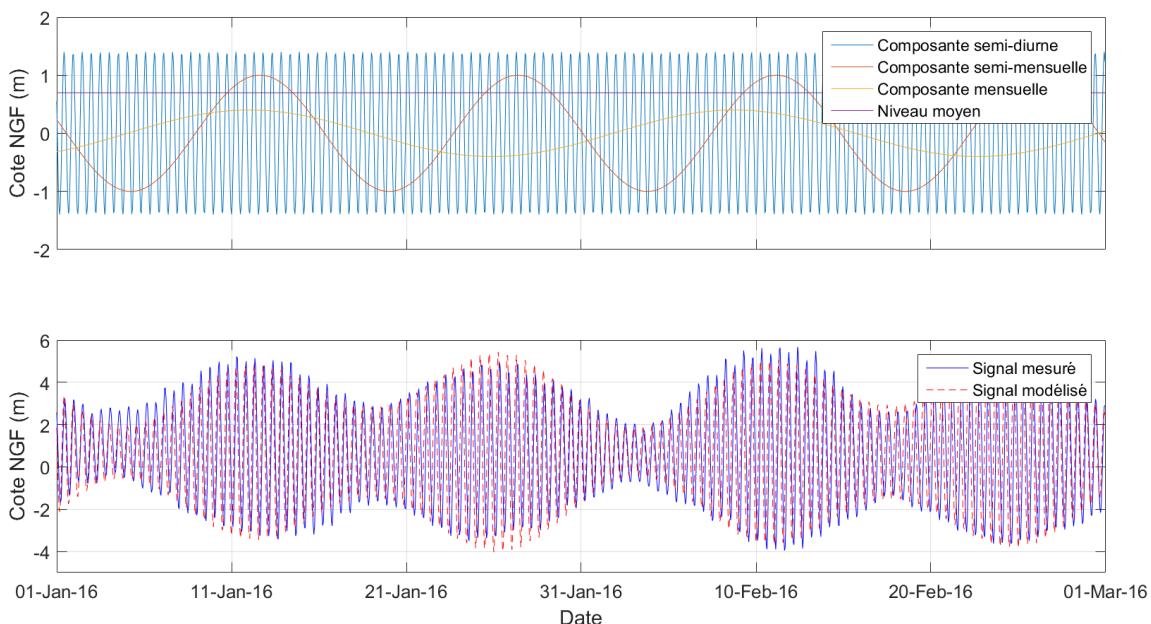


Figure 6 - Reconstitution de l'onde de marée de Diélette (Source : SHOM) à partir des 4 composantes principales du signal (Niveau moyen, journalière, semi-mensuelle et mensuelle)

L'équation suivante permet de reconstituer le signal de Diélette en prenant en compte les 4 composantes précédentes :

$$h(t) = h_{mean} + \left(A_1 \sin \left(\frac{2\pi}{T_1} t + \varphi_1 \right) - A_2 \sin \left(\frac{2\pi}{T_2} t + \varphi_2 \right) \right) \times A_3 \sin \left(\frac{2\pi}{T_3} t + \varphi_3 \right) \quad (6)$$

avec :

- h_{mean} : la composante continue ;
- $A_1 \sin \left(\frac{2\pi}{T_1} t + \varphi_1 \right)$: la composante semi-mensuelle ;
- $A_2 \sin \left(\frac{2\pi}{T_2} t + \varphi_2 \right)$: la composante mensuelle ;
- $A_3 \sin \left(\frac{2\pi}{T_3} t + \varphi_3 \right)$: la composante semi-diurne.

L'équation (6) sera utilisée pour simuler les variations du niveau marin dues à la marée dans le modèle de Bréville-sur-Mer, en utilisant les amplitudes, le niveau moyen et la différence entre le zéro hydrographique et la référence altimétrique (IGN69) pour le port de Granville mis à disposition par le SHOM [2016].

3.2 Propagation de l'onde de marée

La propagation d'une onde de marée dans un aquifère dépend de son amplitude, de sa période et des propriétés physiques de l'aquifère. Nielsen [1990] explicite l'influence de ces différentes composantes grâce à une solution analytique approchée :

$$h(x, t) = h_{mean} + A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{x}{l_c}\right) e^{-\frac{x}{l_c}} + Bx. \quad (7)$$

$h(x, t)$ est la hauteur d'eau dans l'aquifère à la distance x de la mer à l'instant t ; h_{mean} est la hauteur d'eau moyenne de la mer; A et T sont l'amplitude et la période de la composante d'onde de marée considérée; Bx représente la mise en charge de l'aquifère par les précipitations; et l_c représente la distance caractéristique de pénétration de l'onde de marée dans l'aquifère. On reconnaît dans cette équation l'expression de la composante d'onde de marée au niveau de la mer ($x=0$) vue précédemment :

$$h(x = 0, t) = h_{mean} + A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right). \quad (8)$$

Le paramètre essentiel de ce modèle est la distance caractéristique de pénétration l_c . En effet, le terme $e^{-\frac{x}{l_c}}$ exprime une atténuation exponentielle de l'amplitude de l'onde de marée. Plus la distance caractéristique de pénétration l_c est faible, plus l'atténuation de l'onde est importante, et moins l'onde de marée pénètre à l'intérieur de l'aquifère. Physiquement, l_c correspond à la distance depuis la mer où l'amplitude de l'onde de marée est égale à 37% de son amplitude initiale. l_c est fonction à la fois des propriétés de l'onde de marée et des propriétés de l'aquifère :

$$l_c = \sqrt{DT/\pi} \quad (9)$$

où T est la période de l'onde de marée et D la diffusivité de l'aquifère. Il est intéressant de noter ici que la distance de pénétration ne dépend pas de l'amplitude de la composante de marée, mais seulement de sa période, les composantes avec une période plus élevée pénétrant plus loin dans l'aquifère. La diffusivité D est un paramètre générique important du fonctionnement des aquifères. Elle exprime la capacité d'un aquifère à réagir à une perturbation, comme une variation de précipitations ou de niveau de la mer. Plus la diffusivité est importante, plus l'aquifère réagit rapidement, et plus les variations se propagent loin. D est une fonction de la perméabilité K , de l'épaisseur e et de la porosité θ de l'aquifère:

$$D = \frac{Ke}{\theta}. \quad (10)$$

De ces trois paramètres, la perméabilité K est le paramètre le plus critique car le plus variable, avec une gamme de valeurs possibles s'étendant sur une dizaine d'ordres de grandeur. En comparaison, l'épaisseur et la porosité de l'aquifère varient sur un, voire deux ordres de grandeur. La perméabilité est évaluée classiquement en réalisant des essais de puits [de Marsily, 1981].

3.3 Résultats

L'objectif des modèles numériques présentés ci-dessous est d'obtenir une évaluation plus adaptée au site de Bréville-sur-Mer de la propagation des ondes de marée que l'approximation analytique de Nielsen, établie pour un aquifère très simplifié. Cependant, l'approximation analytique nous fournit d'une part une solution de comparaison et de validation pour les modèles numériques, et d'autre part une compréhension a priori des processus mis en jeu, notamment de certains paramètres clés comme la période de l'onde de marée ou la perméabilité de l'aquifère. Les résultats ci-dessous représentent la propagation de la composante semi-mensuelle de l'onde de marée dans un milieu homogène et hétérogène ainsi que la propagation de la composante journalière. La recharge par les précipitations efficaces est considérée constante et égale à 180 mm/an, correspondant à la moyenne des précipitations efficaces sur les 50 dernières années dans la zone du Mont-Saint-Michel (Source : [SURFEX](#) Météo France). Nous considérons un aquifère de surface de dix mètres d'épaisseur et de porosité $\theta = 5\%$.

3.3.1 Impact de la composante semi-mensuelle

La simulation d'un modèle de perméabilité homogène égale à 10^{-3} m/s (Figure 7) montre que la composante semi-mensuelle de l'onde de marée est presque totalement amortie à un kilomètre de la côte (Figure 7c). En revanche, la diffusivité (ou perméabilité) étant relativement forte, le milieu a une capacité importante à évacuer la recharge qui se caractérise par une épaisseur importante de la zone non-saturée. On observe que, dans ce cas, le fonctionnement de l'aquifère reste très simple, comparable à celui du modèle de Nielsen (Figure 7c).

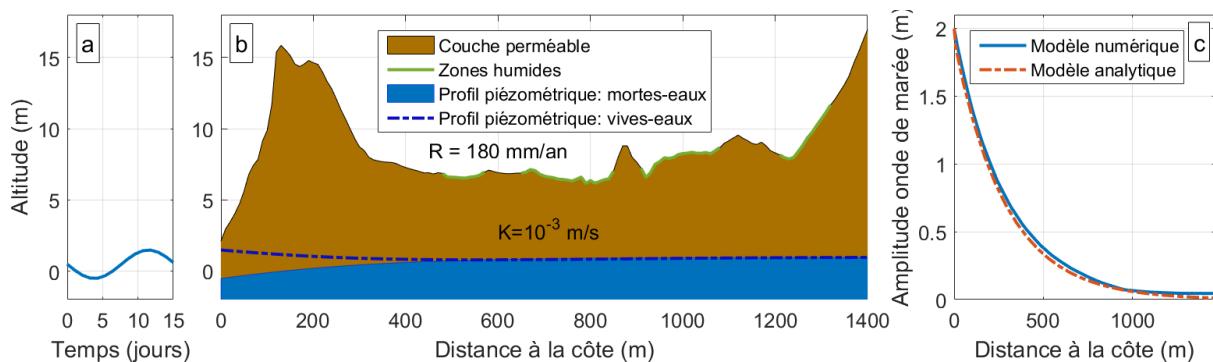


Figure 7 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle ($A=1m$ et $T=15j$). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. c. Comparaison entre le modèle numérique et le modèle analytique. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans.

Afin d'observer l'impact d'une diminution de la diffusivité sur la propagation de l'onde de marée, des simulations complémentaires ont été réalisées pour une perméabilité de l'aquifère de 10^{-4} m/s (Figure 8) et 10^{-5} m/s (Figure 9). La comparaison entre ces 3 simulations montre comment la diminution de la diffusivité entraîne une diminution de la propagation de l'onde de marée et de la capacité de l'aquifère à vidanger la recharge.

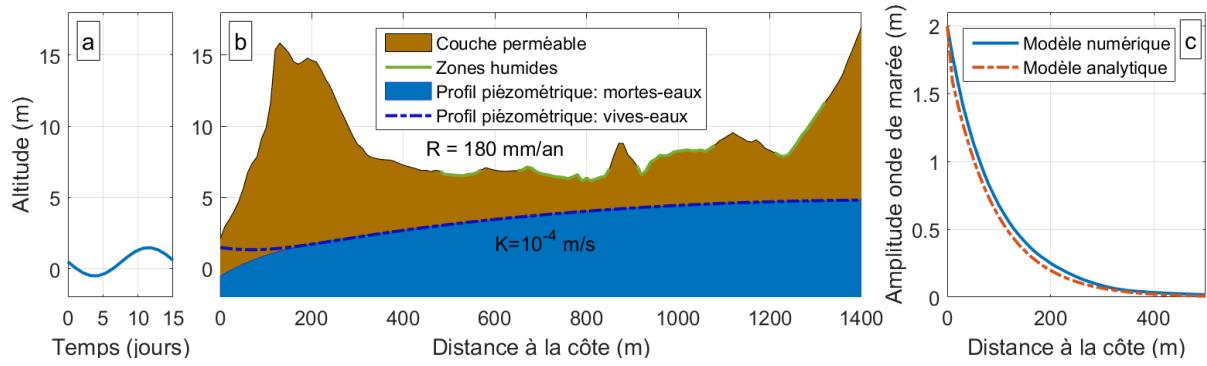


Figure 8 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle ($A=1\text{m}$ et $T=15\text{j}$). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. c. Comparaison entre le modèle numérique et le modèle analytique. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans.

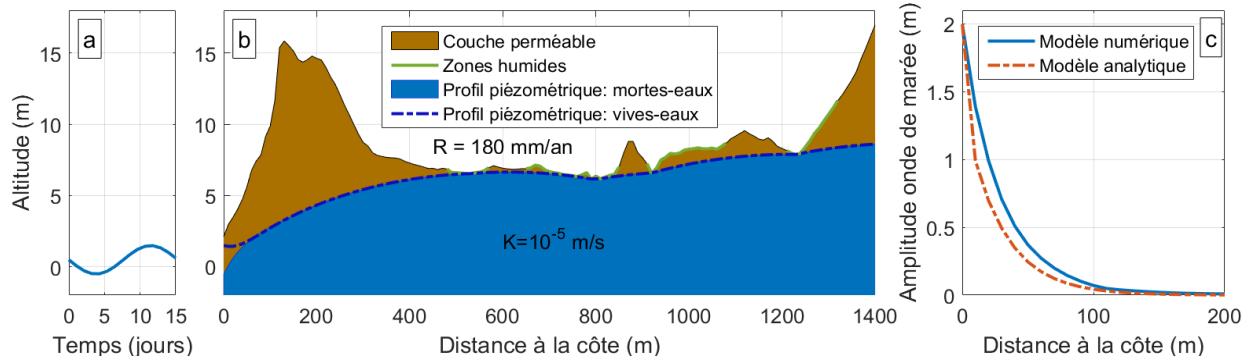


Figure 9 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle ($A=1\text{m}$ et $T=15\text{j}$). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. c. Comparaison entre le modèle numérique et le modèle analytique. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans.

L'hypothèse d'un milieu de perméabilité homogène est toutefois une hypothèse forte. Nous présentons sur la Figure 10 les résultats de simulation obtenus pour un aquifère hétérogène, où une partie continentale de perméabilité $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ (sablonneuse) est protégée par une dune (sables) dont la perméabilité est 100 fois plus élevée que celle de la partie continentale. Les résultats montrent qu'une dune avec une diffusivité plus importante permet à une partie du milieu continental de se vidanger. La dune permet de garder un niveau moyen proche de celui de la mer menant à un gradient de charge important dans la zone de transition des perméabilités à 250 m de la mer. Ce gradient de charge permet à la partie continentale de l'aquifère de se vidanger plus facilement. Ainsi, non seulement la valeur moyenne de la perméabilité de l'aquifère, mais aussi sa variabilité constituent des paramètres importants à caractériser.

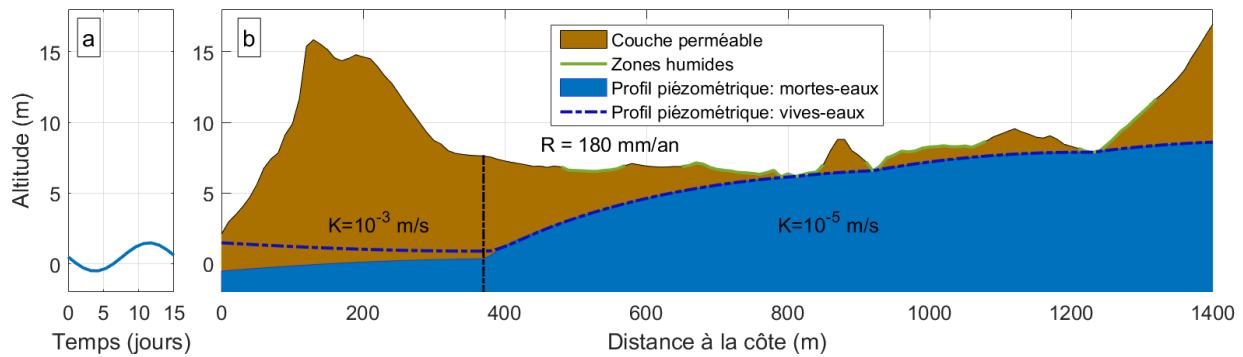


Figure 10 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuel ($A=1\text{m}$ et $T=15\text{j}$). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer, pour une perméabilité $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ dans la dune et $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ dans la partie continentale amont. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans. A noter, l'hétérogénéité des perméabilités ne permet pas d'appliquer le modèle analytique de Nielsen.

3.3.2 Impact de la composante journalière

Les simulations de la section précédente ont montré que la composante semi-mensuelle de la marée ne se propage que de quelques centaines de mètres, au maximum d'un kilomètre, dans l'aquifère côtier. En accord avec la solution approchée de Nielsen, la composante journalière devrait être atténuée encore plus rapidement, car de période plus faible (équation (12)). La Figure 11 montre la propagation de l'onde de marée journalière dans le cas favorable d'une perméabilité élevée $K=10^{-3} \text{ m/s}$. En dépit de son amplitude importante, de l'ordre de 5 m, la composante journalière se propage beaucoup moins loin que la composante semi-mensuelle, à seulement 200 m contre 1000 m précédemment.

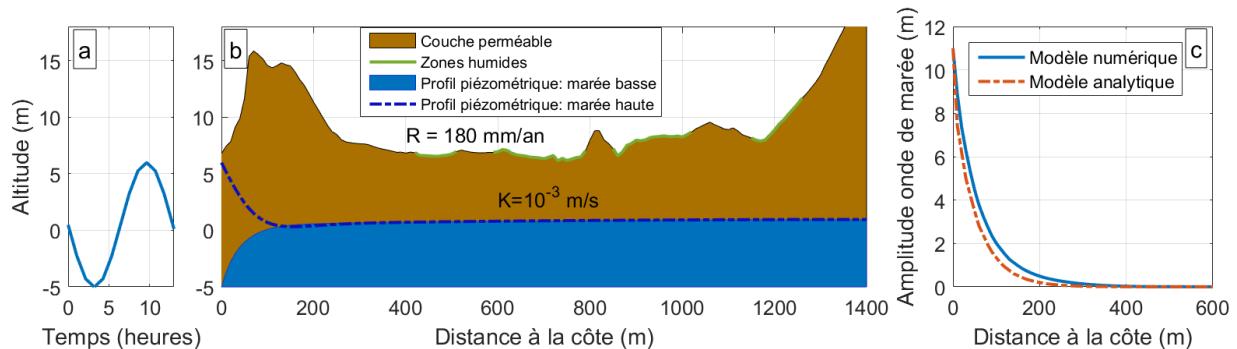


Figure 11 - a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante journalière ($A=5.5\text{m}$ et $T=12\text{h}$). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans.

3.4 Interprétation des résultats

Dans le cas d'un aquifère relativement homogène, les simulations précédentes ont montré un bon accord entre le modèle numérique de Bréville-sur-Mer et la solution analytique approchée de Nielsen (Figure 7c, Figure 8c, Figure 9c et Figure 11c). Ainsi, il est intéressant d'utiliser cette solution approchée et notamment la distance caractéristique de pénétration l_c (équation (9)) comme indicateur de la capacité des ondes de marées à pénétrer l'aquifère. Un ensemble de valeurs de cette distance de pénétration l_c évalués pour différentes propriétés de l'aquifère

et périodes d'onde de marée est présenté dans le Tableau 1. Le Tableau 2 synthétise l'atténuation de l'amplitude de l'onde de marée selon la distance à la côte, exprimée comme une fonction de la distance de pénétration l_c .

	Composante journalière $T=12\text{h}$	Composante semi-mensuelle $T=15\text{j}$
$K (\text{m.s}^{-1})$	$l_c (\text{m})$	$l_c (\text{m})$
10^{-2}	166	908
10^{-3}	52	288
10^{-4}	17	91
10^{-5}	5	29
10^{-6}	2	9

Tableau 1 :– Distance caractéristique de pénétration de l'onde de marée l_c calculée pour différentes valeurs de perméabilité de l'aquifère et de période d'onde de marée, pour un aquifère ayant une porosité de 5% et une épaisseur de 10m.

x	0	$0.7l_c$	l_c	$3l_c$	$5l_c$
Amplitude mesurée, en % de l'amplitude à la mer	100%	50%	37%	5%	1%

Tableau 2 – Atténuation de l'amplitude d'une onde de marée à une distance x de la côte, exprimée en fonction de la distance caractéristique de pénétration l_c . L'atténuation de l'amplitude est exprimée comme le rapport de l'amplitude mesurée à la position x par rapport à l'amplitude à la mer.

La propagation de l'onde de marée est restreinte dans le milieu continental (Tableau 1). La décroissance des amplitudes des variations piézométriques est exponentielle comme prédict par l'approximation analytique de Nielsen [1990] (Tableau 2). L'onde de marée ne se propage pas au-delà du cordon dunaire. Dans le cas d'un cordon dunaire squelettique, l'onde de marée ne pénétrera que peu dans les marais arrière-littoraux en raison de la faible diffusivité des matériaux qui les constituent. L'effet des marées se limite aux zones en connexion directe avec la mer.

La diffusivité de l'aquifère a une forte influence sur l'ennoiement des zones proches du marais. La diffusivité est le facteur déterminant de l'état de saturation des sols avec des variations très fortes entre les modèles réalisés pour des perméabilités allant de 10^{-5} m/s à 10^{-3} m/s . La durée relative de saturation des zones humides pourrait être un critère clef à la fois pour la définition de la vulnérabilité et la calibration de la diffusivité.

L'état de saturation des environs du marais a un rôle déterminant dans la capacité à emmagasiner le flux continental. Pour une large gamme de valeurs de perméabilités représentatives de la réalité (10^{-4} m/s à 10^{-5} m/s), la mise en charge de la dune par l'onde de marée est moins contraignante que les circulations souterraines continentales. Ce sont ces circulations qui dominent l'état de saturation des zones de marais et de la paléofalaise.

Les systèmes dunaires et paléofalaises sont assez déconnectés d'un point de vue hydraulique. D'un côté, les marées ne se propagent pas sur le système paléofalaise, de l'autre côté, dans les cas de saturation importante, le marais est l'exutoire principal des écoulements venant de la paléofalaise. Pour des aquifères plus épais, l'approximation de Dupuit peut se révéler trop contraignante. Des modèles 2D résolus sur la profondeur devraient être réalisés.

La faible propagation de l'onde de marée montre l'absence d'effets transitoires liés aux marées. C'est un point plus méthodologique mais important. Les effets transitoires pourraient être liés à la variabilité saisonnière de la charge bien plus qu'à la marée.

Un effet éventuellement important des hétérogénéités de diffusivité peut être attendu. Une diffusivité 100 fois plus importante de la dune par rapport aux zones de marais mène à une vidange d'une partie de l'aquifère autrement saturé jusqu'à la surface.

Enfin, on note que ce sont les mécanismes et les ordres de grandeur qui ont été étudiés ici, et que les modèles n'ont pas cherché à reproduire exactement les zones d'émergence de la nappe telles que constatées sur le terrain. Cependant, dans le cas d'une perméabilité de 10^{-5} m/s (Figure 9), la piézométrie vient tangenter les principales zones humides observées sur le terrain, indiquant que les hypothèses choisies restent proches de la réalité.

4. L'augmentation du niveau marin et son influence

4.1 Prédictions de l'augmentation du niveau marin

La section précédente a montré que la marée n'a qu'un impact très limité sur la vulnérabilité du milieu aux inondations. En revanche, le niveau moyen de la mer semble être un facteur important puisque l'océan constitue l'exutoire du système sur le site d'étude de Bréville-sur-Mer. C'est pour cela que l'augmentation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique, passée (Figure 12) et à venir (Section 4.1), peut avoir un effet sur la saturation du milieu. Dans la suite de l'étude, les effets transitoires de la marée seront négligés, et seules les variations du niveau moyen de la mer seront retenues.

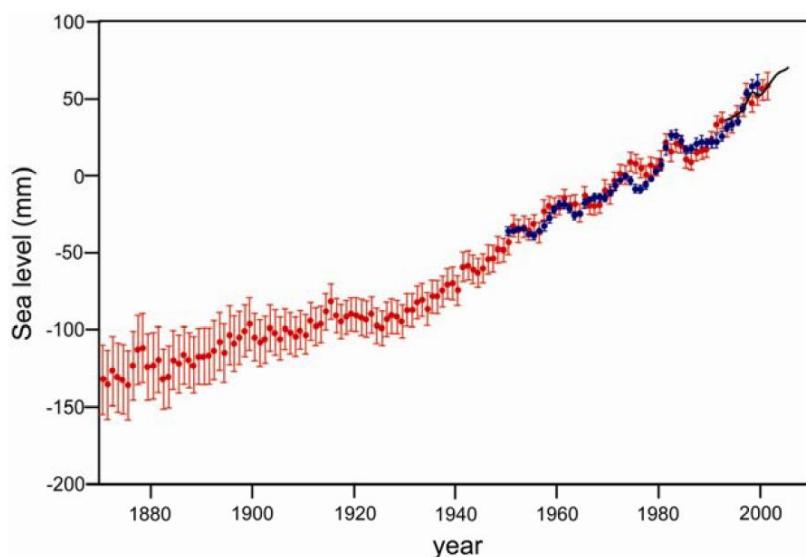


Figure 12 - Augmentation de la moyenne annuelle du niveau mondial de la mer mesuré depuis 1870 [IPCC, 2007].

L'évolution future du niveau moyen de la mer fait l'objet d'études la part du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Dans son dernier rapport (sixième rapport d'évaluation), différents scénarios d'évolution du niveau de la mer en fonction des émissions de gaz à effet de serre sont proposés, depuis un scénario optimiste (RCP2.6) vers un scénario plus pessimiste (RCP8.5) [Pachauri et al., 2014].

Le Tableau 3 synthétise l'augmentation du niveau moyen de la mer par rapport au niveau moyen actuel pour deux périodes : 2046-2065 et 2081-2100. Pour les simulations à suivre, ce sont les prédictions sur la période 2081-2100 qui seront utilisées en sélectionnant la valeur la plus importante de la plage probable. Les valeurs d'augmentation du niveau marin sélectionnées sont ainsi :

- RCP2,6 : augmentation de 0,55m ;
- RCP4,5 et RCP6,0 : augmentation de 0,63m ;
- RCP8,5 : augmentation de 0,82m ;
- Deux valeurs supplémentaires d'augmentation possible : 1m et 2m.

		2046–2065		2081–2100	
	Scénario	Moyenne	Plage probable ^c	Moyenne	Plage probable ^c
Évolution de la température moyenne à la surface du globe (°C) ^a	RCP2,6	1,0	0,4 à 1,6	1,0	0,3 à 1,7
	RCP4,5	1,4	0,9 à 2,0	1,8	1,1 à 2,6
	RCP6,0	1,3	0,8 à 1,8	2,2	1,4 à 3,1
	RCP8,5	2,0	1,4 à 2,6	3,7	2,6 à 4,8
	Scénario	Moyenne	Plage probable ^d	Moyenne	Plage probable ^d
Élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale (m) ^b	RCP2,6	0,24	0,17 à 0,32	0,40	0,26 à 0,55
	RCP4,5	0,26	0,19 à 0,33	0,47	0,32 à 0,63
	RCP6,0	0,25	0,18 à 0,32	0,48	0,33 à 0,63
	RCP8,5	0,30	0,22 à 0,38	0,63	0,45 à 0,82

Tableau 3 - Évolution projetée de la température moyenne à la surface du globe et de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale pour le milieu et la fin du XXIe siècle par rapport à la période de référence 1986-2005 [Pachauri et al., 2014].

4.2 Augmentation du niveau marin : solution analytique

La propagation de l'augmentation du niveau marin moyen dans l'aquifère peut être rendue par l'approximation analytique suivante (Annexe 11.2) :

$$h(x) = \sqrt{-\frac{R}{K}x^2 + \frac{2RL}{K}x + h_1^2}. \quad (11)$$

$h(x)$ est la hauteur du toit de nappe à la distance x de la côte. $h_1 = h(x = 0)$ est le niveau marin moyen. R est la recharge. K et L sont respectivement la perméabilité et la longueur de l'aquifère. Pour le site de Bréville-sur-Mer, L correspondrait typiquement à la distance entre la côte et la falaise. Ce modèle fait l'hypothèse d'un aquifère plan, de perméabilité homogène, et où le toit de nappe ne recoupe pas la topographie. On note également que cette équation décrit le niveau moyen du toit de la nappe, et ne peut pas rendre compte de variations temporelles du niveau marin ou de la recharge (écoulements en régime permanent).

Enfin, contrairement à la solution analytique développée dans la section précédente (section 3), aucun indicateur synthétique comparable à la distance caractéristique de pénétration de la marée l_c n'émerge ici, aussi l'équation (11) doit être considérée dans sa totalité.

4.3 Résultats

Dans cette section, nous comparons les profils piézométriques impactés par une augmentation du niveau moyen de la mer au profil piézométrique “actuel” (c'est-à-dire imposé par le niveau marin actuel). Cette comparaison permet d'observer l'évolution de la profondeur de nappe induite par une augmentation du niveau de la mer.

Nous considérons dans un premier temps un aquifère de perméabilité importante $K=10^{-4}$ m/s. Lorsque le niveau moyen de la mer augmente de 2 mètres (Figure 13), l'ensemble de la piézométrie du système est augmentée. En revanche, la piézométrie n'augmente pas partout de la même valeur. Comme montre la Figure 14a, l'augmentation du niveau par rapport au niveau actuel décroît avec la distance à la côte.

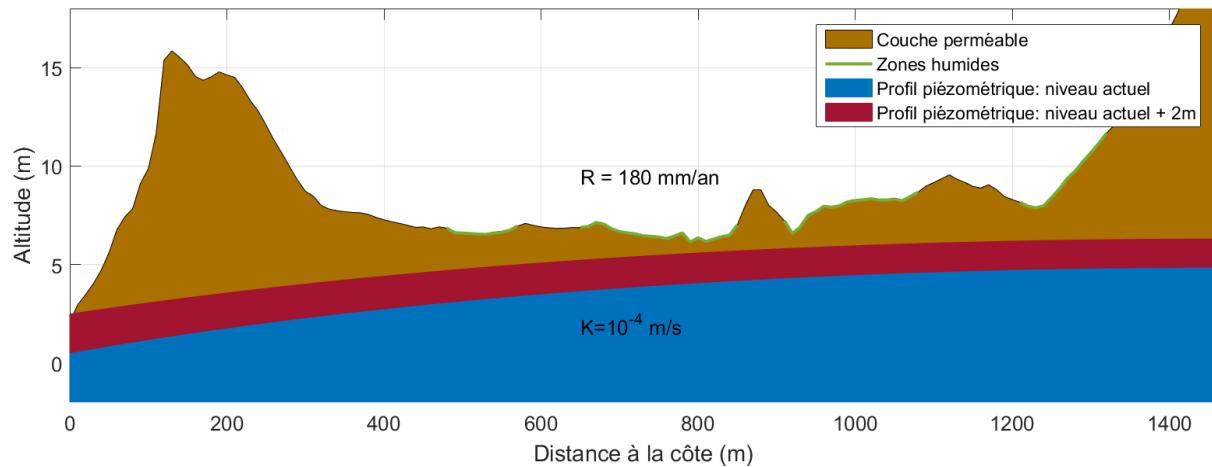


Figure 13 – Représentation des profils piézométriques du niveau moyen marin actuel et avec une augmentation de 2m dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$.

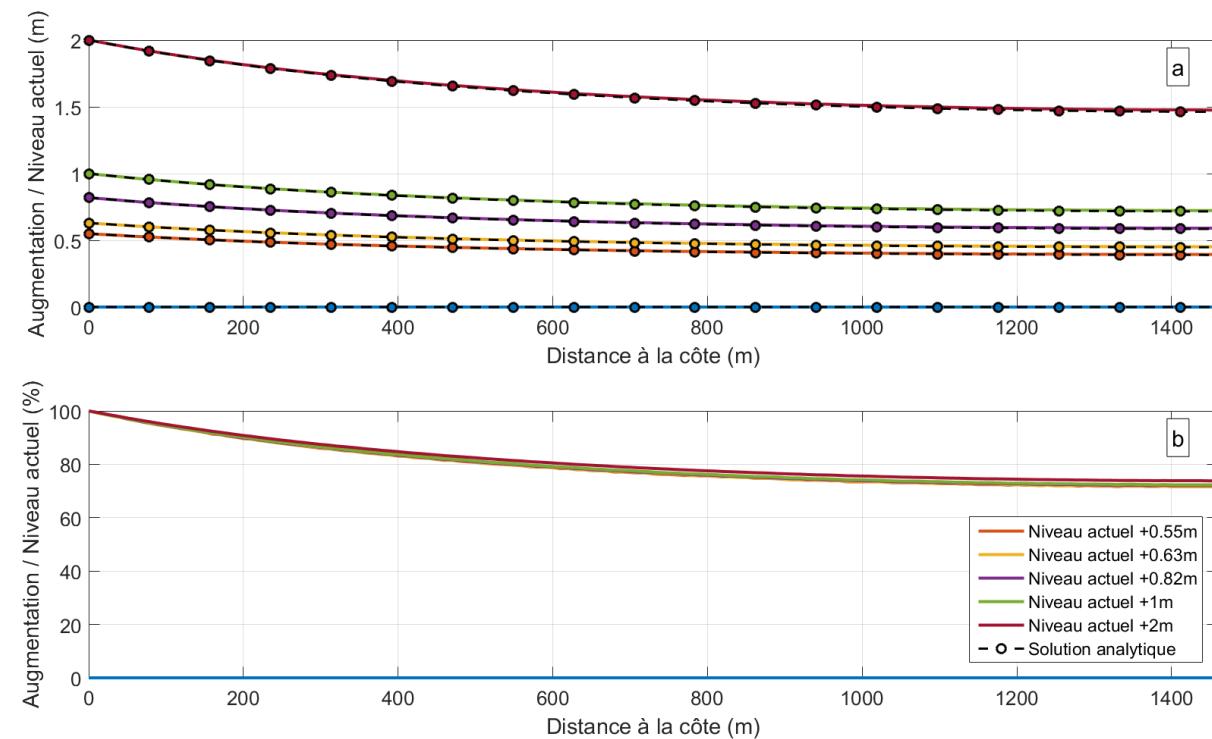


Figure 14 - a. Profils piézométriques modélisés (modèles numériques et analytiques) pour le site de Bréville-sur-Mer, pour différents scénarios d'augmentation du niveau marin moyen. b. Augmentation modélisée de la hauteur du toit de nappe normalisée par l'augmentation du niveau marin moyen (100% étant l'augmentation du niveau moyen de la mer).

Ainsi, pour une augmentation du niveau marin moyen de 2 mètres, l'augmentation du niveau de la nappe n'est que de 1,5 m à 1500 m de la côte (ligne rouge, Figure 14a). Cette atténuation de l'effet de l'augmentation du niveau marin à mesure que la distance à la côte augmente est la même, relativement, quelle que soit l'augmentation du niveau marin (Figure 14b). Ainsi, à une distance de 1500 m à la côte, l'augmentation du niveau de la nappe ne correspond qu'à 75% de l'augmentation du niveau marin moyen. Bien que contre-intuitif, ce résultat est une conséquence directe de la physique des écoulements en milieu poreux, qui voit la capacité de

vidange d'un aquifère libre (i.e. non confiné par une couche imperméable à son sommet) augmenter avec la hauteur du toit de nappe (section 4.2).

Pour une perméabilité importante comme vue précédemment ($K=10^{-4}$ m/s), le toit de la nappe n'intersecte pas la topographie. Des simulations additionnelles sont donc réalisées en considérant une perméabilité plus faible $K=10^{-5}$ m/s (Figure 15).

On remarque que les profils piézométriques intersectent la topographie à environ 500 m de distance à la côte. Derrière ce point d'intersection, aucune évolution du niveau piézométrique n'est observée. Ce premier point d'intersection constituerait donc une limite à la propagation de l'augmentation du niveau marin dans le domaine continental (Figure 16a). On note comme précédemment que l'augmentation relative du niveau de la nappe par rapport au niveau moyen marin est la même quel que soit l'augmentation du niveau marin (Figure 16b).

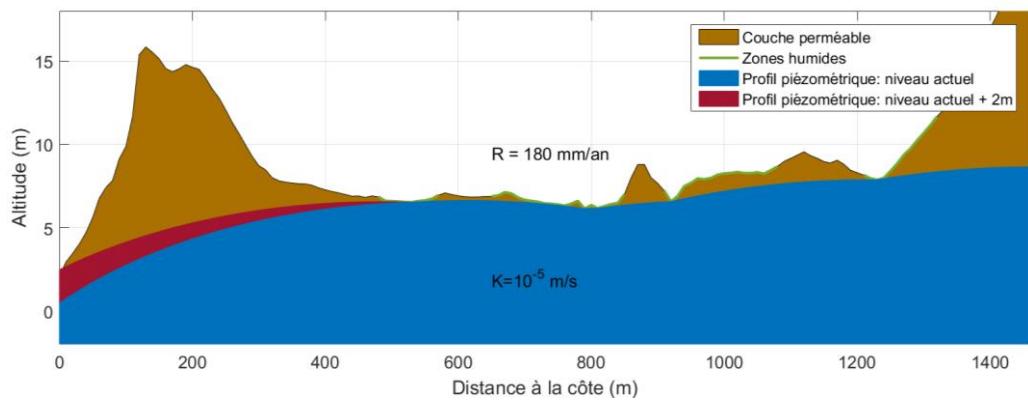


Figure 15 - Représentation des profils piézométriques du niveau moyen marin actuel et avec une augmentation de 2m dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-5}$ m.s⁻¹.

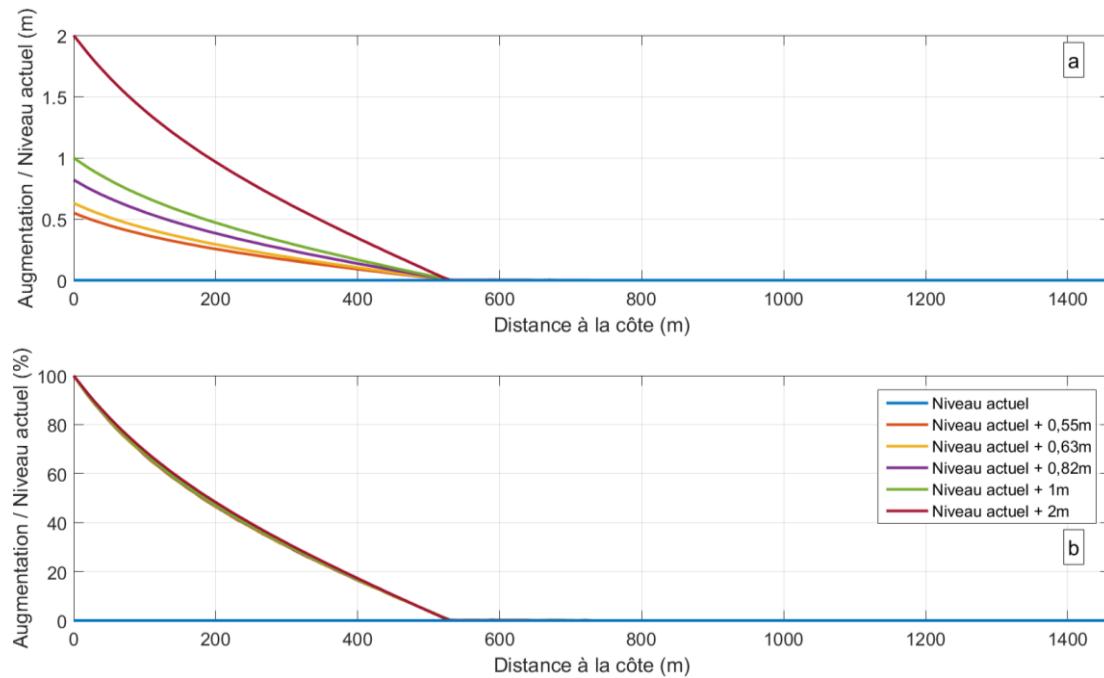


Figure 16 - a. Evolution du profil piézométrique (en m) par rapport au niveau moyen. b. Evolution du profil piézométrique (en %) par rapport au niveau moyen (100% étant l'augmentation du niveau moyen de la mer).

4.4 Interprétation des résultats

Les résultats des simulations montrent que l'augmentation du niveau moyen de la mer entraîne une élévation globale du profil piézométrique dans le cas où le profil n'intersecte pas la topographie. Cette élévation est atténuée à mesure que la distance avec la mer augmente, mais reste significative jusqu'à plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres.

Il est possible d'utiliser la solution analytique de l'équation (11) afin d'obtenir une estimation de l'élévation de la hauteur du toit de nappe entraînée par l'augmentation du niveau marin (Tableau 4). Comme observé précédemment (section 3), plus la perméabilité de l'aquifère est faible (et plus la distance à la mer augmente), plus l'influence maritime diminue. Contrairement à la marée cependant, la pénétration de l'influence du niveau marin moyen est beaucoup plus importante, de l'ordre de plusieurs kilomètres, quand la marée ne se propage que sur quelques centaines de mètres au maximum. Les zones post-dunaires sont donc directement menacées par l'augmentation du niveau marin moyen liée au changement climatique.

	Atténuation de l'augmentation du niveau marin moyen (%)					
	10^{-2}	-0,06	-0,24	-0,5	-0,9	-1,5
10^{-3}	-0,6	-2,3	-5	-8,4	-12,3	
10^{-4}	-5,5	-17,8	-30,7	-41,5	-50	
10^{-5}	-32,6	-58,5	-70,9	-77,7	-82	
10^{-6}	-72,3	-85,7	-90,4	-92,8	-94,2	
$K (\text{m.s}^{-1})$	$L = 0,5 \text{ km}$	$L = 1 \text{ km}$	$L = 1,5 \text{ km}$	$L = 2 \text{ km}$	$L = 2,5 \text{ km}$	

Tableau 4 - Différence entre l'augmentation du niveau marin moyen et l'élévation du toit de nappe mesuré à une distance L de la côte, pour différentes valeurs de perméabilité de l'aquifère. La différence est exprimée en pourcentage de l'augmentation du niveau marin moyen.

Dans le cas où le profil piézométrique intersecte la topographie, cette intersection se comporte comme un drain naturel modifiant le régime des écoulements souterrains. Cette intersection stoppe la propagation de l'influence du niveau marin à l'intérieur des terres, et devient l'exutoire de la partie continentale. Une telle intersection joue donc un rôle protecteur pour les zones continentales en amont hydraulique, mais au prix d'être elle-même une zone à très fort risque hydrologique.

5. Les variations météorologiques et leurs impacts

5.1 Vitesse de vidange d'une dune après un évènement pluvieux

Le milieu souterrain et le cordon dunaire en particulier ont un effet potentiel d'amortissement des forçages météorologiques. L'amortissement est d'autant plus important que la saturation en eau initiale de l'aquifère est faible. Le volume disponible augmente la capacité d'infiltration et diminue en proportion les transferts directs par ruissellement.

5.1.1 Approximation analytique

Le rôle des dunes peut être abordé dans un premier temps par un problème élémentaire de réaction d'une dune à une perturbation hydrologique que ce soit un remplissage rapide lié à une recharge importante ou une vidange lié à une absence totale de recharge. L'analyse de ce problème permet de déterminer un temps de réaction caractéristique de la dune à un forçage externe.

Ce problème peut être approché en effectuant le développement analytique de l'équation de Boussinesq (Annexe 11.1). Ce développement permet d'établir la solution analytique suivante :

$$h(t) - h_1 = \frac{h(0) - h_1}{1 + \frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

où $h(t)$ est la hauteur d'eau maximale dans la dune à l'instant t , h_1 est la hauteur d'eau de la mer et τ est le temps caractéristique de vidange. Physiquement, le temps caractéristique τ correspond au temps au bout duquel la hauteur d'eau initiale maximum dans la dune a été divisée par deux. τ est donné par l'expression suivante :

$$\tau = \frac{3}{4} \frac{L^2}{D} \quad (13)$$

où L est la demi-largeur de la dune et D est la diffusivité de l'aquifère (équation (10))

5.1.2 Résultats

Nous considérons une dune de largeur $L=16$ m, de hauteur $(h_0 - h_1)=15$ m, de perméabilité $K=10^{-3}$ m.s⁻¹ et de porosité $\theta=25\%$ (sables). Le modèle a pour condition initiale une saturation en eau complète du milieu, le milieu se vidangeant alors progressivement avec le temps (Figure 17).

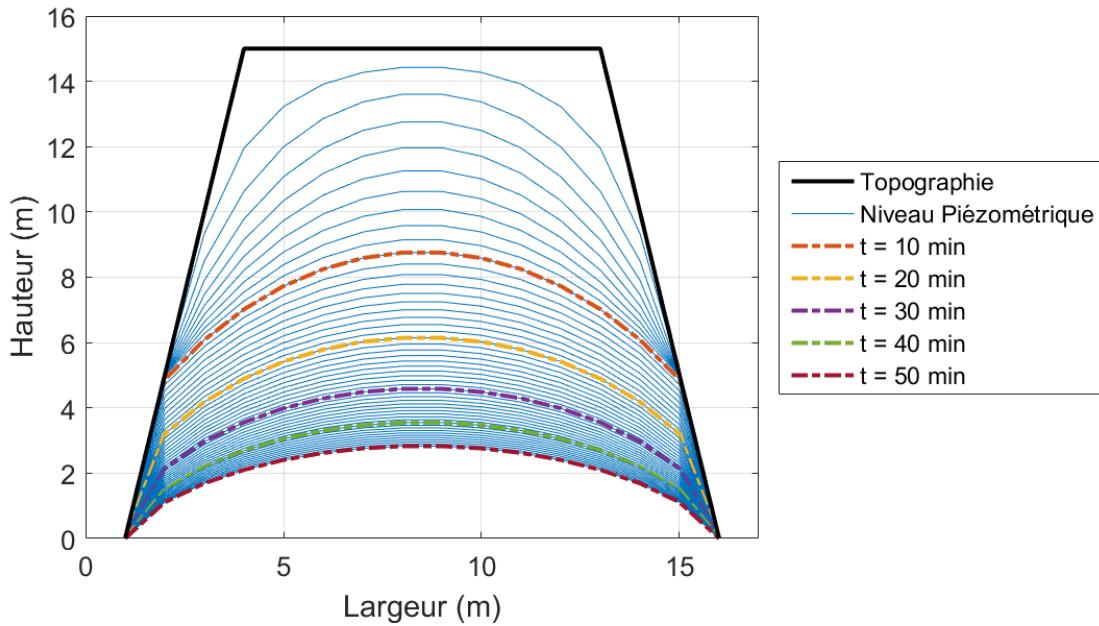


Figure 17 - Représentation de l'évolution piézométrique toutes les minutes de la vidange du modèle numérique

Nous comparons les résultats du modèle numérique à ceux de l'approximation analytique (Section 5.1.1). La ligne bleue de la Figure 18a représente l'évolution du niveau piézométrique au centre de la dune obtenue par l'approximation analytique, où $\tau=23,7$ min est le temps caractéristique de vidange. La ligne rouge de la Figure 18a représente les résultats du modèle numérique. La différence relative entre les deux est représentée sur la Figure 18b.

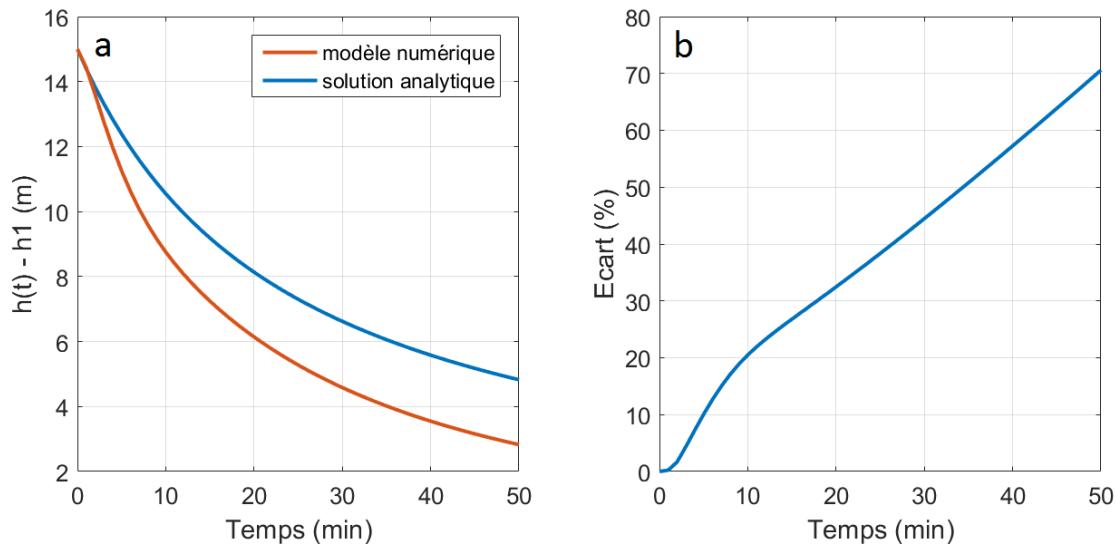


Figure 18 – a. Représentation du modèle numérique et de l'approximation analytique de la vidange d'une dune. b. Représentation de l'écart (en %) entre le modèle numérique et l'approximation analytique.

On observe que la vidange s'effectue plus vite avec le modèle numérique qu'avec l'approximation analytique. L'écart (en %) entre les deux modèles augmente avec le temps et atteint 70% au bout de 50 minutes. Cette différence s'explique par les approximations faites dans le développement analytique et par une forme de dune légèrement différente dans le modèle numérique.

5.1.3 Interprétation des résultats

Les résultats montrent que la forme de la dune à une importance lors de la vidange de la dune. Ce constat doit être cependant relativisé puisque pour atteindre le même niveau piézométrique on observe une différence de temps d'environ 15 min, qui est très faible si l'on prend l'échelle temps d'une inondation sur une zone comme Bréville-sur-Mer. L'approximation analytique proposée en section 5.1.1 peut être considérée comme une évaluation correcte de la dynamique du système.

5.2 Effet météorologique sur le modèle de Bréville-sur-Mer

Un modèle a été réalisé pour observer les effets transitoires d'une variation de précipitations. Ce modèle s'étend sur 1,5 km à l'est sur la paléofalaise (Figure 3) afin de prendre en compte les flux continentaux. La chronique de recharge (Figure 19a) utilisée pour la simulation s'étend sur 730 jours où l'on observe deux périodes de pluies efficaces correspondant aux périodes automnale et hivernale. Cette chronique correspond aux précipitations efficaces évaluées sur la zone du Mont-Saint-Michel par le modèle [SURFEX](#) de Météo-France de mai 2010 à mai 2012.

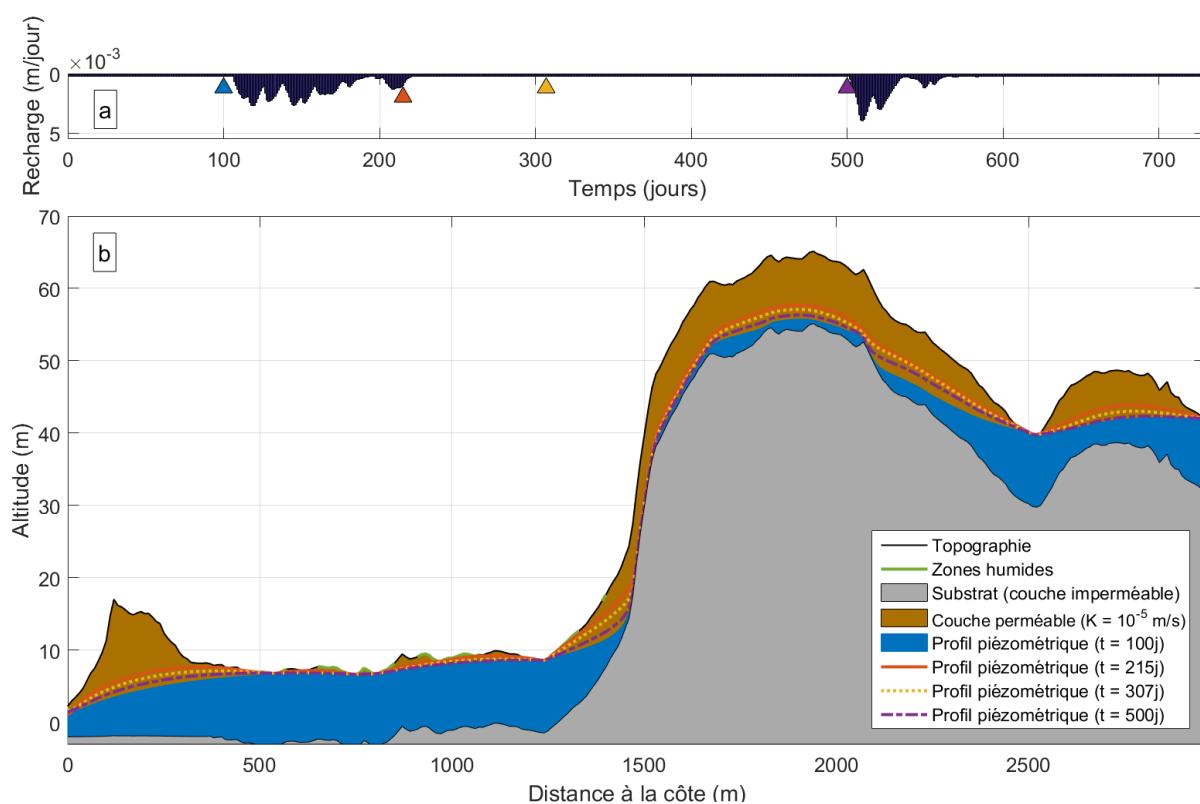


Figure 19 - Modèle du site de Bréville-sur-Mer avec une aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-5}$ m/s prenant en compte la paléofalaise. a. Représentation de la recharge appliquée au modèle sur 2 ans (730 jours). b. Représentation de 4 profils piézométriques à différents temps (100, 215, 307 et 500 jours).

Le profil piézométrique initial, correspondant à l'équilibre avec les précipitations initiales, est représenté par la zone bleue sur la Figure 19b et la Figure 20. Ce profil évolue par la suite avec le temps, dont plusieurs instants sont représentés par plusieurs couleurs. Ainsi, le profil piézométrique à 215 jours, en rouge, correspond au niveau maximum durant le premier

évenement pluvieux. Les profils jaune et violet correspondent à la vidange de l'aquifère. On remarque qu'à la fin de la période estivale ($t = 500$ jours, profil violet), la nappe ne s'est pas vidangée au point d'atteindre son profil d'équilibre (profil bleu), montrant la difficulté du milieu à évacuer la recharge emmagasinée, notamment sur la partie dunaire et les colluvions de pente en bas de la paléofalaise.

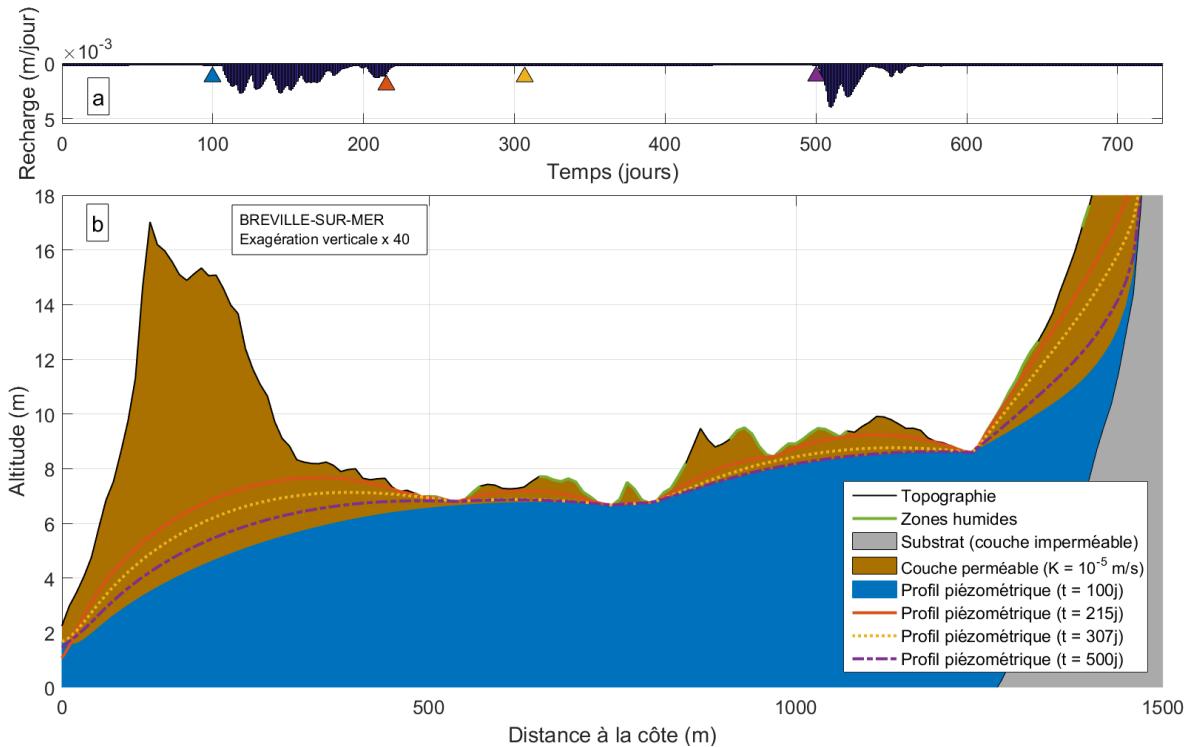


Figure 20 - Zoom sur les parties topographiques basses de la Figure 19.

Les résultats de cette simulation peuvent être exprimés de manière à représenter le territoire en fonction de la durée pendant laquelle il est saturé en eau, pour un niveau de nappe donné. La Figure 21 propose un exemple de cette représentation pour une profondeur critique de 50 cm. On remarque que les zones où la nappe reste toujours à moins de 50 cm de profondeur par rapport au sol (zones rouge foncé) correspondent aux zones humides observées sur le terrain. Les parties hautes du cordon dunaire, à contrario, représentées en bleu foncé, ont toujours une nappe située à une profondeur excédant 50 cm par rapport au sol.

Ces résultats peuvent également être représentés sur un modèle de terrain 3D drapé sur la carte IGN (Figure 22, gauche). Dans un souci de représentation et d'affichage, le modèle en coupe a été légèrement élargi. Les résultats du modèle sont comparés à une photographie aérienne du site représentant les zones inondées durant la période hivernale de 2001 (Figure 22, droite). Des repères spatiaux entre les deux figures sont matérialisés par les points A et B. La comparaison entre deux figures met en évidence la concordance des résultats obtenus par modélisation et ceux acquis sur le terrain (zones humides et zones de débordement de la nappe phréatique observées en 2001).

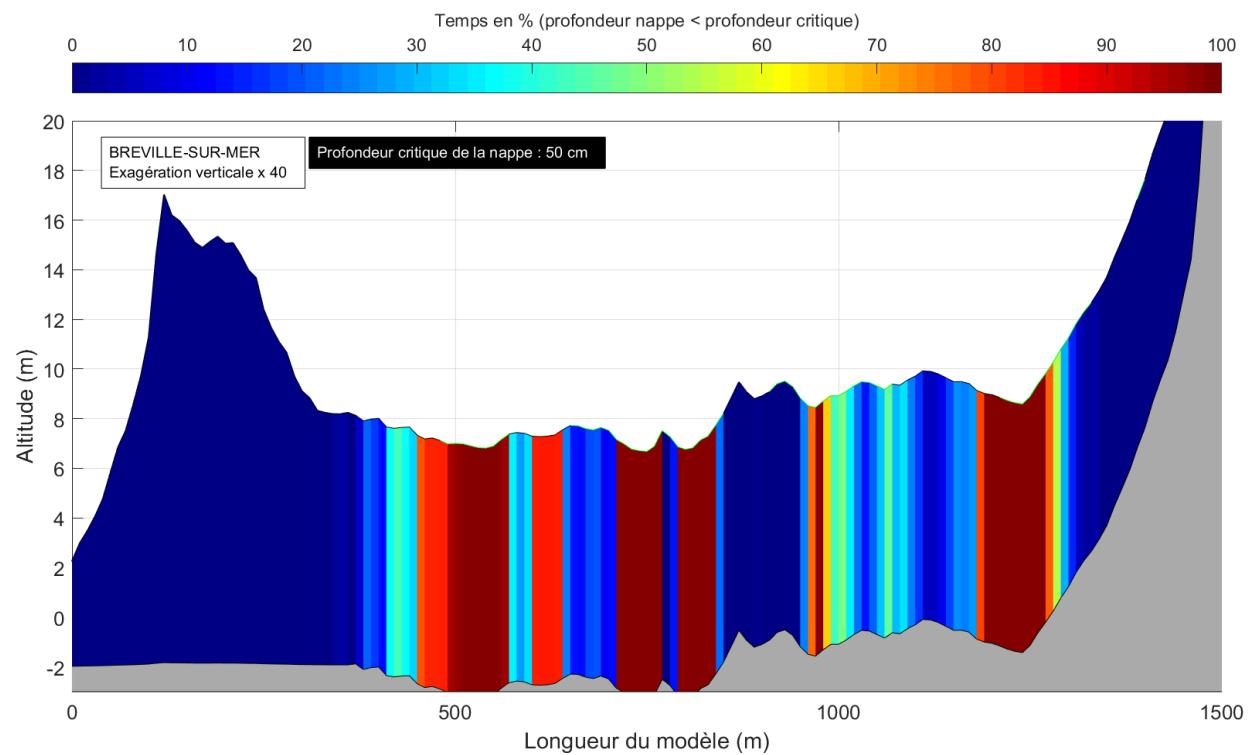


Figure 21- Pour les parties littorales basses du site de Bréville-sur-Mer, représentation du pourcentage de temps au cours duquel le toit de nappe se situe au-dessus d'une profondeur critique de 50 cm.

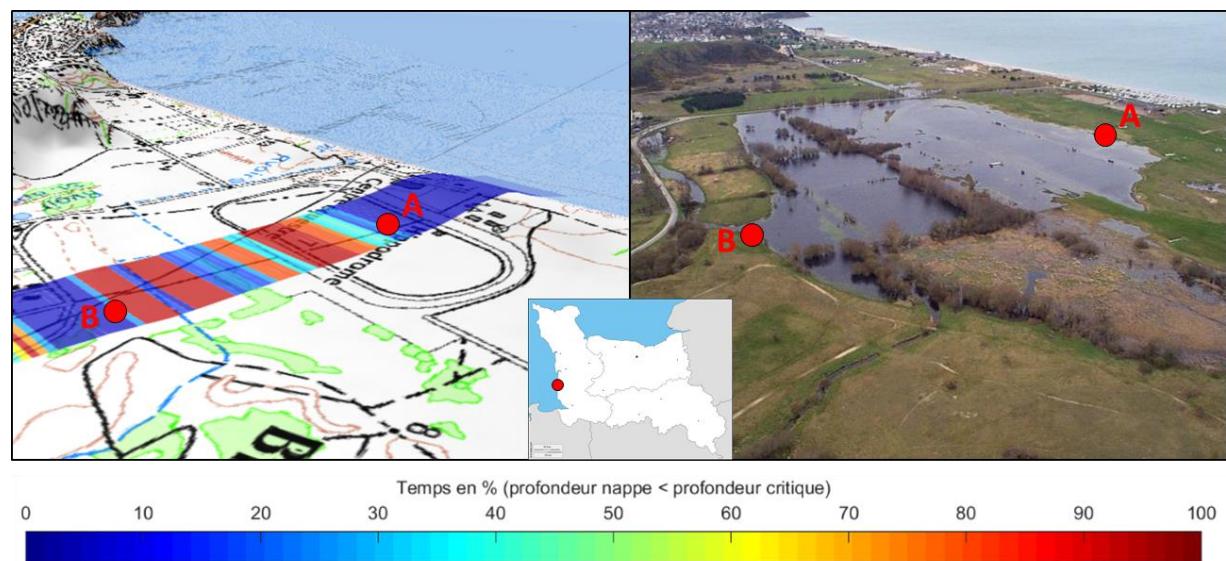


Figure 22 – Droite : projection des résultats du modèle du site de Bréville-sur-Mer sur la carte IGN associée, exprimés en durée de saturation des sols (données de la Figure 21). Gauche : Photographie aérienne de l'inondation de 2001 sur le site de Bréville-sur-Mer. Des repères spatiaux entre les deux figures sont matérialisés par les points A et B.

5.3 Directions, temps de circulation et exutoires des écoulements

Dans cette section, nous utilisons le logiciel MODPATH [Pollock, 2016] afin de caractériser plus en détail les directions et temps de circulation de l'eau dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer. MODPATH est un logiciel de post-traitement des simulations MODFLOW qui simule l'injection de particules au niveau de la recharge et suit leur déplacement dans l'aquifère. Ce suivi permet de caractériser les lignes d'écoulements dans l'aquifère, ainsi que les temps de transit associés. Dans le cas du modèle de Bréville-sur-Mer, l'absence de discréétisation verticale (modèle à une couche) empêche MODPATH de déterminer la localisation verticale des particules, même si les composantes horizontales de leur trajectoire reste correctement évaluées. A des fins de représentation, nous faisons l'hypothèse que la profondeur atteinte par les particules dans l'aquifère est proportionnelle à leur temps de transit total.

Deux simulations ont été réalisées afin d'étudier l'effet notamment de la recharge sur les circulations :

- Simulation avec une recharge de 73 mm/an, équivalent à la recharge estivale moyenne sur les cinquante dernières années (Figure 23)
- Simulation avec une recharge de 180 mm/an, correspondant à la recharge moyenne globale sur les cinquante dernières années (Figure 24).

Dans les deux cas, la perméabilité de l'aquifère est homogène et égale à 10^{-5} m.s^{-1} (faible perméabilité).

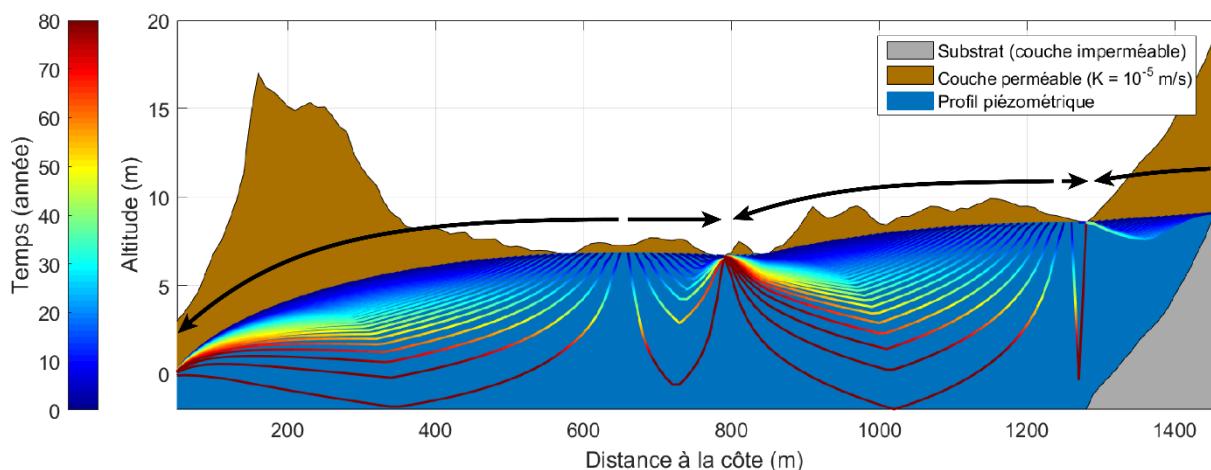


Figure 23 –Représentation des lignes d'écoulements (régime d'écoulement permanent) et temps de transit associés une recharge de 73 mm/an et une perméabilité d'aquifère $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Les flèches noires indiquent la direction des écoulements, mettant en évidence les zones d'exutoire (pointes des flèches) et les lignes de crêtes hydrologiques (origine des flèches) des écoulements.

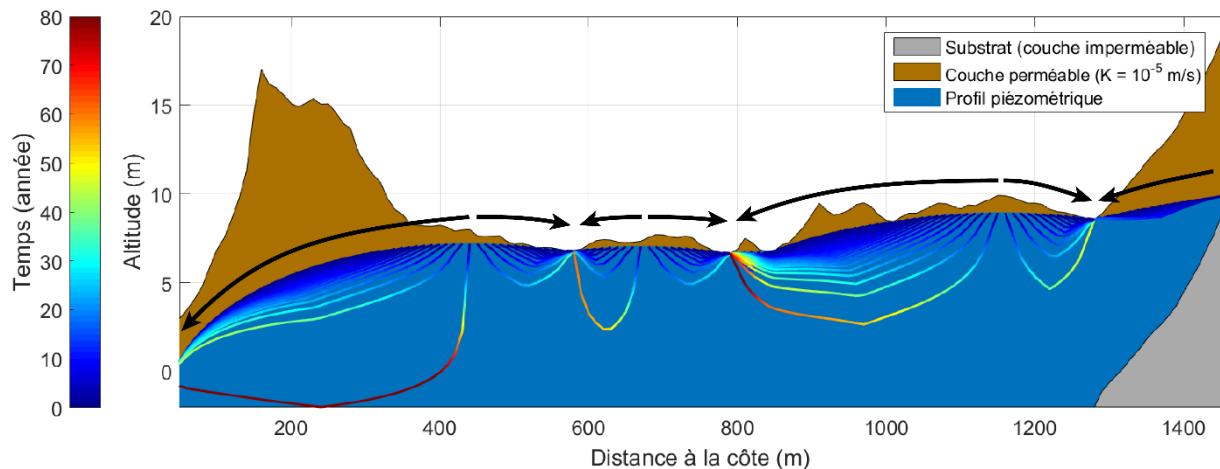


Figure 24 - Représentation des lignes d'écoulements (régime d'écoulement permanent) et temps de transit associés une recharge de 180 mm/an et une perméabilité d'aquifère $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Les flèches noires indiquent la direction des écoulements, mettant en évidence les zones d'exutoire (pointes des flèches) et les lignes de crêtes hydrologiques (origine des flèches) des écoulements.

On observe que l'augmentation du niveau piézométrique liée à une augmentation des précipitations entraîne l'apparition de points de drainage additionnels correspondant à des dépressions topographiques locales. L'augmentation du nombre de points de drainage se traduit par une diminution des distances et des temps de transit entre les zones de recharge et d'exutoire. Ainsi, une augmentation du niveau piézométrique moyen, liée par exemple à un changement du régime des précipitations ou à une augmentation du niveau marin causés par le changement climatique, se traduira par une augmentation du nombre des zones vulnérables aux débordements de nappe. Cependant, en diminuant les distances et temps de transit dans le milieu souterrain, la présence d'un nombre élevé de points de drainage pourrait favoriser l'évacuation de substances indésirables (pesticides...). Ce dernier point pourrait par exemple favoriser la reconversion de territoires agricoles en zones naturelles ou en pêcheries.

6. Discussion

6.1 Calibration de la diffusivité

Ces trois études ont montré que le paramètre important dans la caractérisation de la vulnérabilité aux inondations par les nappes phréatiques est la diffusivité du milieu souterrain. En effet plus la diffusivité est faible moins le milieu dispose d'une capacité à se vidanger. En revanche, une faible diffusivité limite les effets de la marée et l'impact des variations maritimes.

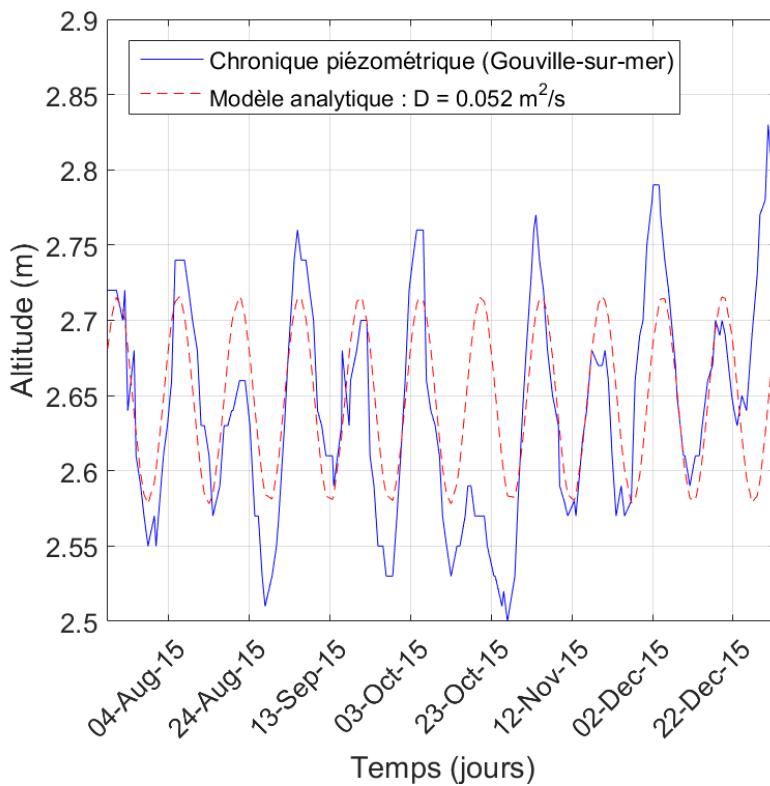


Figure 25 - Calibration de la diffusivité sur la zone de Gouville-sur-mer

Pour déterminer la vulnérabilité des zones de la Manche aux inondations, il est nécessaire de bien calibrer la diffusivité. Une méthode de calibration possible se base sur les chroniques piézométriques et l'approximation analytique de Nielsen [1990]. L'objectif est de reproduire la chronique piézométrique à l'aide de l'équation (6) en prenant l'amplitude et la période de la composante semi-mensuelle de la marée et la distance du piézomètre à la côte. La Figure 25 montre la calibration obtenue à l'aide de la chronique piézométrique sur un piézomètre de Gouville-sur-Mer. La diffusivité obtenue est de $0,052 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ donne une perméabilité d'environ 10^{-3} m.s^{-1} pour une épaisseur d'aquifère de 10 m et une porosité de 25% (sables).

Cette méthode permet de déterminer la diffusivité globale entre le trait de côte et le piézomètre c'est-à-dire les zones proches (environ 300 m) du trait de côte.

6.2 Impact de la maritimisation d'un drain arrière-littoral

Les études réalisées précédemment ont mis en évidence le rôle majeur des drains arrières-littoraux. Ces drains, qui correspondent à des points d'intersection entre le toit de la nappe phréatique et la topographie, constituent des points d'arrêt à la propagation de l'influence marine sur la hauteur du toit de nappe (marée, augmentation du niveau marin moyen). Cependant, ces drains correspondent à des points topographiques bas pouvant à terme être menacés de maritimisation par l'augmentation du niveau marin moyen. Dans cette section, nous investiguons les conséquences de la mise en charge d'un drain arrière-littoral par la mer. Pour cela, un modèle numérique en coupe est réalisé pour le site de Coudeville-Plage, immédiatement au nord de Bréville-sur-Mer (Figure 26).

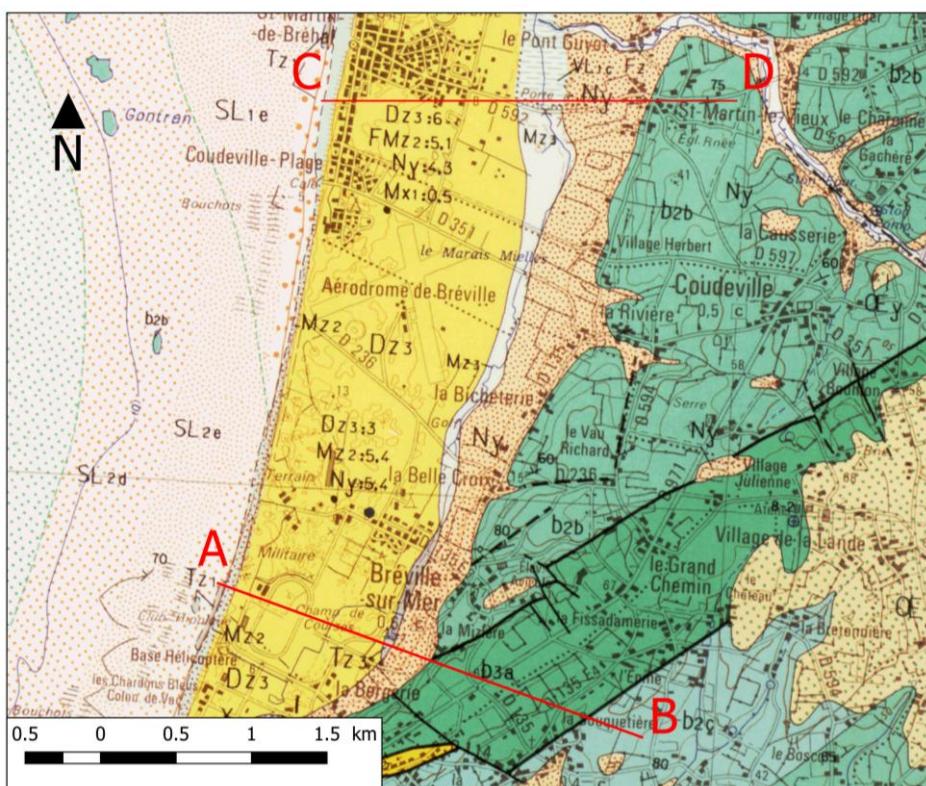


Figure 26 – Carte géologique de la zone de Bréville-sur-Mer [Doré and Bignot, 1987]. Le modèle de Bréville-sur-Mer est localisé le long de la coupe AB, le modèle de Coudeville-Plage le long de la coupe CD.

Le site de Coudeville-Plage a été retenu car étant très semblable d'un point de vue hydrogéologique au site de Bréville-sur-Mer (perméabilité, porosité et épaisseur de l'aquifère, caractéristiques géomorphologiques), mais présentant contrairement au système endoréique de ce dernier un drain connecté directement à la mer, donc plus vulnérable aux influences maritimes. Les paramètres du modèle de Coudeville-Plage sont pris identiques à ceux du modèle de Bréville-sur-Mer, à l'exception de la topographie et de la mise en charge possible du drain par la mer. Nous considérons le cas le plus défavorable où le drain répercute directement, sans atténuation ou effets de seuil, les variations du niveau marin comme des variation de charge hydraulique. Il s'agit à nouveau de comprendre les mécanismes et les ordres de grandeurs mis en jeu dans les processus, plus qu'une tentative de prédiction précise du comportement du système.

6.2.1 Niveau moyen actuel

Nous étudions d'abord l'impact de la mise en charge du drain par la mer dans le cas du niveau marin moyen actuel. Deux simulations sont réalisées en considérant une perméabilité de l'aquifère égale à 10^{-3} m/s (Figure 27) et 10^{-4} m/s (Figure 28). Alternativemement, ces résultats peuvent être considérés comme représentant les niveaux piézométriques moyens en périodes d'étiage (Figure 27) et de recharge (Figure 28). Pour un niveau piézométrique haut, la mise en charge du drain, assimilé ici au marais arrière-littoral, n'a que peu d'influence sur la charge hydraulique dans l'aquifère (Figure 28). Cette influence est en revanche beaucoup plus marquée pour un niveau piézométrique bas. Dans ce cas, la mise en charge du marais induit une augmentation du niveau piézométrique dans l'ensemble de l'aquifère (Figure 27). Le marais vient alors recharger l'aquifère au lieu d'en constituer un exutoire, impliquant par exemple un risque renforcé de salinisation en période d'étiage.

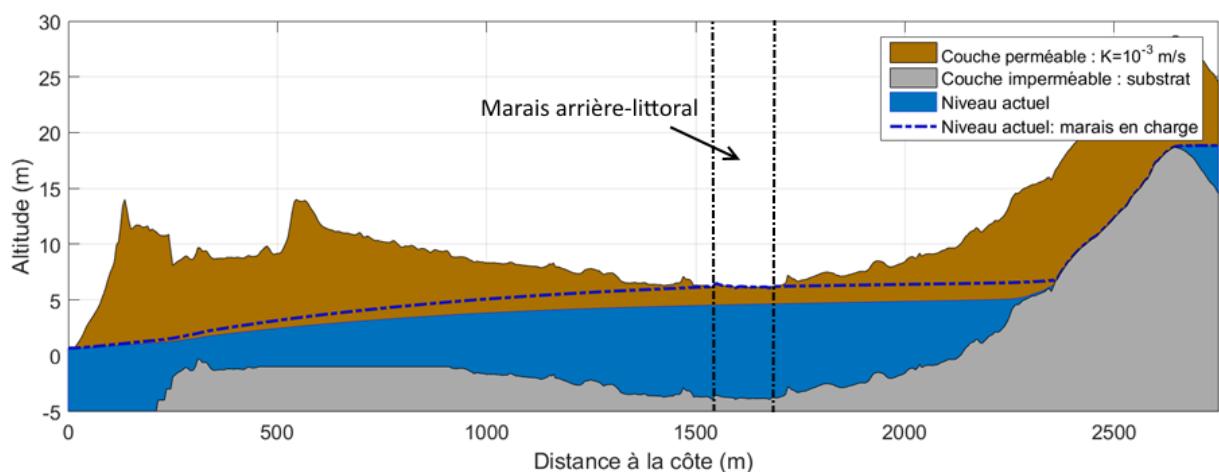


Figure 27 - Comparaison des profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage pour un marais arrière-littoral mis en charge ou non par la mer, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et le niveau marin moyen actuel. La charge hydraulique dans le marais lorsque le marais est en charge est imposée égale à la topographie. Le signal de marée n'est pas pris en compte.

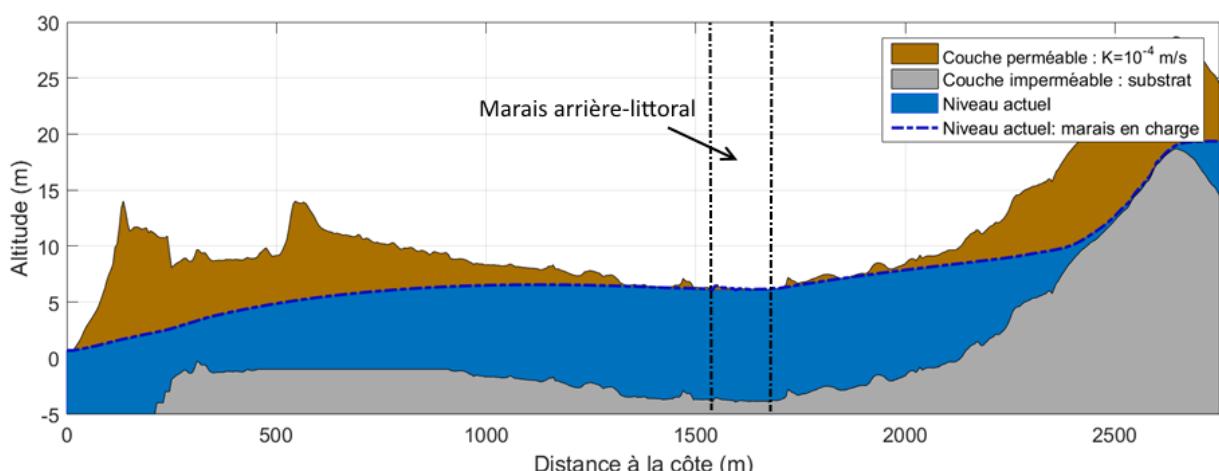


Figure 28 – Comparaison des profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage pour un marais arrière-littoral mis en charge ou non par la mer, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et le niveau marin moyen actuel. La charge hydraulique dans le marais lorsque le marais est en charge est imposée égale à la topographie. Le signal de marée n'est pas pris en compte.

6.2.2 Propagation de l'onde de marée

La maritimisation du marais arrière-littoral implique que les territoires immédiatement adjacents au marais deviennent susceptibles aux variations de niveau piézométrique induites par la marée (Figure 29 et Figure 30), alors qu'ils en étaient protégés en l'absence de mise en charge par la mer (Section 3). La distance de pénétration de l'onde de marée augmente avec la longueur de sa période (la composante semi-mensuelle pénétrant plus loin que la composante journalière) et avec la perméabilité de l'aquifère. La présence de dépressions topographiques locales limite la propagation de l'onde de marée en période de vives eaux. A noter, l'impact supplémentaire d'une conjonction entre période de précipitations intenses et période de vives-eaux n'a pas été étudié ici mais constituera probablement un facteur important de vulnérabilité.

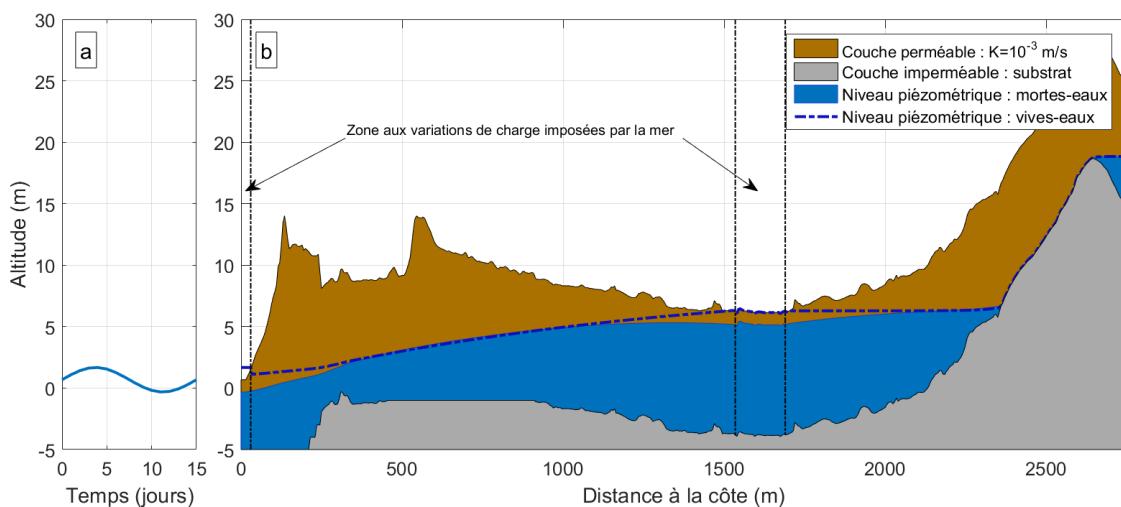


Figure 29 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle ($A=1\text{m}$ et $T=15\text{j}$). b. Comparaison des profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage en période de vives eaux et mortes eaux pour un marais arrière-littoral mis en charge par la mer, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et le niveau marin moyen actuel.

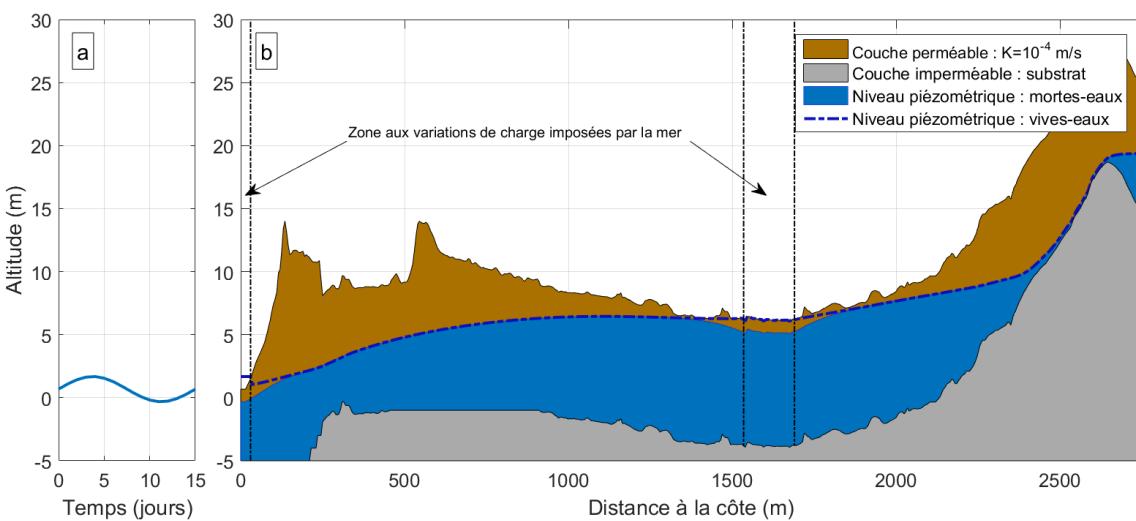


Figure 30 - a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle ($A=1\text{m}$ et $T=15\text{j}$). b. Comparaison des profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage en période de vives eaux et mortes eaux pour un marais arrière-littoral mis en charge par la mer, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et le niveau marin moyen actuel.

6.2.3 Propagation d'une augmentation du niveau marin moyen

Un ensemble de simulations est finalement réalisé afin d'évaluer les conséquences de la maritimisation du marais arrière-littoral sur la propagation d'une augmentation du niveau marin moyen. En l'absence de mise en charge par la mer, le marais se comporte comme un drain naturel qui limite la propagation de l'influence maritime dans l'aquifère (Figure 31), comme vu dans la section 4.

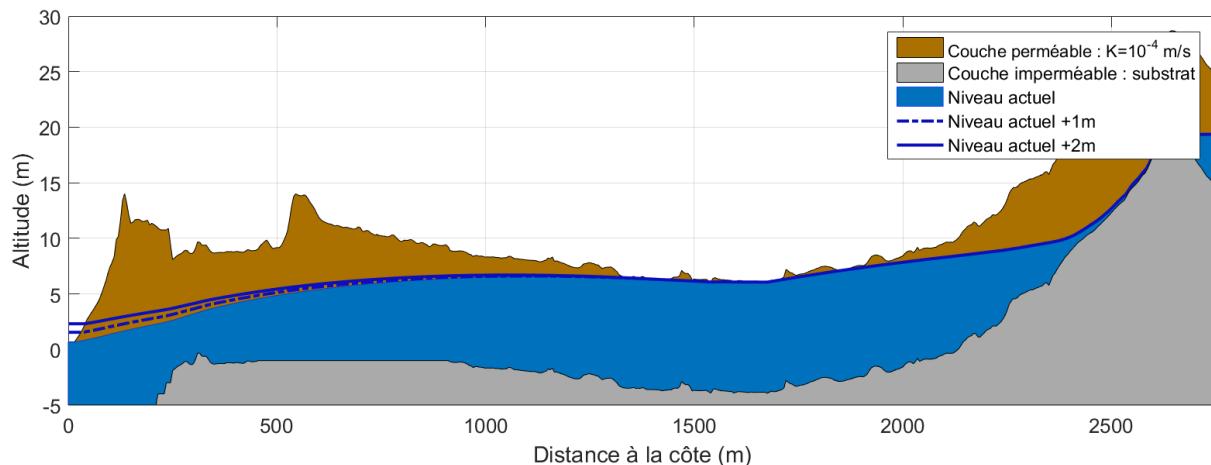


Figure 31 – Profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage pour un **marais arrière-littoral non mis en charge par la mer**, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et trois niveaux marins moyens : actuel, actuel +1m, actuel +2m.

En revanche, lorsque le marais est mis en charge par la mer, il répercute l'augmentation du niveau marin sur les zones environnantes au lieu de la stopper (Figure 32). Cette augmentation est particulièrement sensible sur le cordon dunaire, où l'augmentation de niveau piézométrique induite par le marais et celle induite par la mer peuvent faire jonction et provoquer une augmentation du niveau piézométrique sur l'ensemble de la dune, là où seule la façade maritime de la dune était impactée auparavant (Figure 31).

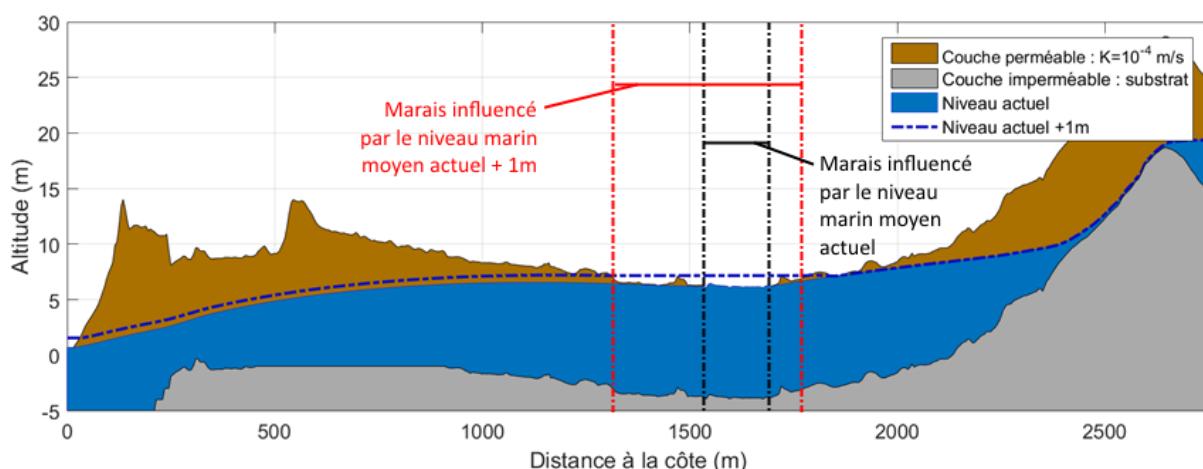


Figure 32 – Profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage pour un **marais arrière-littoral mis en charge par la mer**, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et deux niveaux marins moyens : actuel et actuel +1m.

L'augmentation du niveau marin se propage également depuis le marais vers l'intérieur des terres dans les colluvions de pente, jusqu'à rencontrer une dépression topographique qui bloque sa progression. Cette dépression joue alors le rôle de drain naturel occupé par le marais avant sa maritimisation, protégeant la zone continentale amont des influences marines, mais constituant elle-même une zone de forte vulnérabilité.

Ainsi, la maritimisation des drains arrière-littoraux peut constituer un facteur de vulnérabilité majeur aux aléas hydrogéologiques. Un critère important à évaluer sera celui de la connectivité des drains entre eux et avec l'océan, et notamment l'opposition entre systèmes endoréiques (cas de Bréville-sur-Mer) et exoréiques (cas de Coudeville-Plage), les systèmes exoréiques étant a priori plus directement vulnérables. Un autre point important sera celui de la temporalité de cette connectivité, certains drains pouvant ne se connecter à la mer que lorsque la mer dépasse un certain seuil, lors de marées exceptionnelles de vives eaux par exemple. Dans le cas de Bréville-sur-Mer, ce seuil se situe à environ neuf mètres d'altitude, niveau qui serait dépassable à l'horizon 2100 en période de grandes marées et pour un niveau marin moyen ayant augmenté d'un mètre.

7. Conclusion

Cette étude sur le site de Bréville-sur-Mer a permis d'investiguer l'impact des forçages maritimes et météorologiques actuels et futurs sur le risque hydrologique. Elle a démontré que les marées n'ont que peu à pas d'impact sur les parties continentales post-dunaires, sous réserve que ces zones ne soient pas mises en charge par une connexion maritime secondaire (cours d'eau, drains, marais maritime...). Si la marée influence peu la dynamique de l'aquifère côtier, l'augmentation du niveau marin moyen peut en revanche induire une augmentation du niveau piézométrique sur l'ensemble du système. Cette augmentation est partiellement atténuée à mesure que la distance avec la côte augmente, mais reste significative à plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. La présence d'un point d'intersection entre le toit de la nappe et la surface du sol limite cependant la propagation de l'augmentation du niveau marin, en agissant comme un drain. Ce point protège les zones continentales amont de l'influence de l'augmentation du niveau marin, mais constitue en contrepartie un point de forte vulnérabilité puisque sous la double influence de la mer et de la décharge des nappes.

Les forçages météorologiques sont un autre facteur dominant dans la caractérisation du risque hydrologique. Si les précipitations sont trop abondantes, l'aquifère reste saturé en eau et est dans l'incapacité de se vidanger face aux évènements pluvieux suivants. Lors de ces périodes de forte recharge, les lignes de flux sont modifiées et des points de drainage secondaires apparaissent dans la partie post-dunaire.

Une faible valeur de diffusivité du milieu souterrain permet d'atténuer plus efficacement la propagation des variations maritimes dans le système, mais limite la capacité de vidange de l'aquifère. L'étude a souligné que la diffusivité constitue un paramètre clé, avec la topographie, du fonctionnement de l'aquifère. La caractérisation de ce paramètre reste cependant difficile sur les côtes du Cotentin du fait du nombre limité de points de mesures. Dans cette étude, une méthode de calibration est proposée, exploitant la propagation du signal de marée dans le cordon dunaire de Gouville-sur-Mer, à partir d'une chronique piézométrique. Afin de réaliser des modèles calibrés et se rapprocher du fonctionnement réel des aquifères, il sera donc nécessaire d'étoffer le réseau piézométrique côtier.

Si cette étude a permis de répondre à certains questionnements sur la dynamique des aquifères côtiers normands et leur réponse possible au changement climatique, elle s'est cependant concentrée sur un site d'étude spécifique et reste à être étendue à d'autres territoires. L'analyse ayant principalement porté sur la caractérisation des processus contrôlant les facteurs d'inondabilité, la structure géologique du modèle a été simplifiée. Par ailleurs, le travail sur des modèles en coupe n'a également pas rendu possible l'étude de phénomènes 3D, comme les phénomènes de pointes ou d'anses, qui peuvent induire une concentration des influences marines ou continentales, respectivement. Le rôle de la connectivité des drains arrière-littoraux avec l'océan, et l'évolution de cette connectivité en rapport avec le changement climatique, reste également à investiguer. Enfin, la salinisation des aquifères côtiers n'a pas été étudiée, bien qu'elle puisse s'avérer critique notamment dans les zones de faible relief qui favorisent la progression du biseau salin. Ces différents aspects seront à

prendre en compte pour caractériser efficacement l'évolution future de l'aléa hydrogéologique dans ces territoires.

8. Références

- De Filippis, G., Borsi, I., Foglia, L., Cannata, M., Velasco Mansilla, V., Vasquez-Suñe, E., Ghetta, M., Rossetto, R. (2017), Software tools for sustainable water resources management: the GIS-integrated FREEWAT platform, *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, Vol. 42, pp. 59-61, doi:10.3301/ROL.2017.14.
- De Marsily, G. (1981), *Hydrogéologie quantitative*, Masson.
- Doré, F., and G. Bignot (1987), *Normandie, Maine*, 2e éd., révisée et complétée. ed., Paris ; New York : Masson.
- Harbaugh, A. W. (2005), MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey modular ground-water model--the ground-water flow process, *Report Rep. 6-A16*.
- IPCC (2007), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.)*, 104.
- Nielsen, P. (1990), *Tidal dynamics of the water table in beaches*, 2127-2134 pp., doi:10.1029/WR026i009p02127.
- Pachauri, R. K., et al. (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 151 pp., IPCC, Geneva, Switzerland.
- Pollock, D. W. (2016), User guide for MODPATH Version 7—A particle-tracking model for MODFLOW, *Report Rep. 2016-1086*, 41 pp, Reston, VA.
- QGIS Development Team (2009), QGIS Geographic Information System, *Open Source Geospatial Foundation*.
- Schureman, P., U. S. Coast, and S. Geodetic (1971), *Manual of harmonic analysis and prediction of tides / by Paul Schureman*, Rev. (1940) ed. (reprinted 1958 with corrections). Reprinted October 1971. ed., U.S. Coast and Geodetic Survey, Washington, D.C. :.
- SHOM (2016), Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer, 120.

9. Table des figures

<i>Figure 1 - Carte de profondeur du toit de nappe phréatique produite par la DREAL Normandie sur la zone de Denneville (Manche). Les zones en rose correspondent à une profondeur de moins de 10cm.....</i>	5
<i>Figure 2 – Modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 5m de la côte depuis Granville (au sud) à Agon-Coutainville (au nord). La position du site de Bréville-sur-Mer est repérée par une pastille noire. Source : IGN.....</i>	7
<i>Figure 3- Carte géologique de la zone de Bréville-sur-Mer [Doré and Bignot, 1987]. Le modèle sera établi le long du segment A-B (en rouge).</i>	7
<i>Figure 4 - Photographie aérienne de l'inondation de l'hippodrome de Bréville-sur-Mer, hiver 2000-2001. Source : DREAL Normandie.....</i>	8
<i>Figure 5 – Organisation des logiciels utilisés dans la conception des modèles hydrologiques de Bréville-sur-Mer.....</i>	9
<i>Figure 6 - Reconstitution de l'onde de marée de Diélette (Source : SHOM) à partir des 4 composantes principales du signal (Niveau moyen, journalière, semi-mensuelle et mensuelle)</i>	10
<i>Figure 7 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle (A=1m et T=15j). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. c. Comparaison entre le modèle numérique et le modèle analytique. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans.....</i>	12
<i>Figure 8 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle (A=1m et T=15j). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. c. Comparaison entre le modèle numérique et le modèle analytique. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans.....</i>	13
<i>Figure 9 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle (A=1m et T=15j). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. c. Comparaison entre le modèle numérique et le modèle analytique. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans.....</i>	13
<i>Figure 10 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuel (A=1m et T=15j). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer, pour une perméabilité $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ dans la dune et $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ dans la partie continentale amont. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans. A noter, l'hétérogénéité des perméabilités ne permet pas d'appliquer le modèle analytique de Nielsen.....</i>	14
<i>Figure 11 - a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante journalière (A=5.5m et T=12h). b. Représentation des profils piézométriques en période de vives eaux et mortes eaux dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. Les précipitations correspondent à la moyenne des précipitations sur cinquante ans.....</i>	14
<i>Figure 12 - Augmentation de la moyenne annuelle du niveau mondial de la mer mesuré depuis 1870 [IPCC, 2007].....</i>	17
<i>Figure 13 – Représentation des profils piézométriques du niveau moyen marin actuel et avec une augmentation de 2m dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$.</i>	19

<i>Figure 14 - a. Profils piézométriques modélisés (modèles numérique et analytique) pour le site de Bréville-sur-Mer, pour différents scénarios d'augmentation du niveau marin moyen. b. Augmentation modélisée de la hauteur du toit de nappe normalisée par l'augmentation du niveau marin moyen (100% étant l'augmentation du niveau moyen de la mer).....</i>	19
<i>Figure 15 - Représentation des profils piézométriques du niveau moyen marin actuel et avec une augmentation de 2m dans l'aquifère de Bréville-sur-Mer pour une perméabilité homogène $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$.....</i>	20
<i>Figure 16 - a. Evolution du profil piézométrique (en m) par rapport au niveau moyen. b. Evolution du profil piézométrique (en %) par rapport au niveau moyen (100% étant l'augmentation du niveau moyen de la mer).....</i>	20
<i>Figure 17 - Représentation de l'évolution piézométrique toutes les minutes de la vidange du modèle numérique</i>	23
<i>Figure 18 – a. Représentation du modèle numérique et de l'approximation analytique de la vidange d'une dune. b. Représentation de l'écart (en %) entre le modèle numérique et l'approximation analytique.</i>	23
<i>Figure 19 - Modèle du site de Bréville-sur-Mer avec une aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-5} \text{ m/s}$ prenant en compte la paléofalaise. a. Représentation de la recharge appliquée au modèle sur 2 ans (730 jours). b. Représentation de 4 profils piézométriques à différents temps (100, 215, 307 et 500 jours).</i>	24
<i>Figure 20 - Zoom sur les parties topographiques basses de la Figure 19.....</i>	25
<i>Figure 21- Pour les parties littorales basses du site de Bréville-sur-Mer, représentation du pourcentage de temps au cours duquel le toit de nappe se situe au-dessus d'une profondeur critique de 50 cm.....</i>	26
<i>Figure 22 – Droite : projection des résultats du modèle du site de Bréville-sur-Mer sur la carte IGN associée, exprimés en durée de saturation des sols (données de la Figure 21). Gauche : Photographie aérienne de l'inondation de 2001 sur le site de Bréville-sur-Mer. Des repères spatiaux entre les deux figures sont matérialisés par les points A et B.</i>	26
<i>Figure 23 –Représentation des lignes d'écoulements (régime d'écoulement permanent) et temps de transit associés une recharge de 73 mm/an et une perméabilité d'aquifère $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Les flèches noires indiquent la direction des écoulements, mettant en évidence les zones d'exutoire (pointes des flèches) et les lignes de crêtes hydrologiques (origine des flèches) des écoulements.</i>	27
<i>Figure 24 - Représentation des lignes d'écoulements (régime d'écoulement permanent) et temps de transit associés une recharge de 180 mm/an et une perméabilité d'aquifère $K=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Les flèches noires indiquent la direction des écoulements, mettant en évidence les zones d'exutoire (pointes des flèches) et les lignes de crêtes hydrologiques (origine des flèches) des écoulements.</i>	28
<i>Figure 25 - Calibration de la diffusivité sur la zone de Gouville-sur-mer.....</i>	29
<i>Figure 26 – Carte géologique de la zone de Bréville-sur-Mer [Doré and Bignot, 1987]. Le modèle de Bréville-sur-Mer est localisé le long de la coupe AB, le modèle de Coudeville-Plage le long de la coupe CD.....</i>	30
<i>Figure 27 - Comparaison des profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage pour un marais arrière-littoral mis en charge ou non par la mer, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et le niveau marin moyen actuel. La charge hydraulique dans le marais lorsque le marais est en charge est imposée égale à la topographie. Le signal de marée n'est pas pris en compte.....</i>	31
<i>Figure 28 – Comparaison des profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage pour un marais arrière-littoral mis en charge ou non par la mer, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et le niveau marin moyen actuel. La charge hydraulique dans le marais lorsque le marais est en charge est imposée égale à la topographie. Le signal de marée n'est pas pris en compte.....</i>	31

Figure 29 – a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle ($A=1m$ et $T=15j$). b. Comparaison des profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage en période de vives eaux et mortes eaux pour un marais arrière-littoral mis en charge par la mer, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et le niveau marin moyen actuel. . 32

Figure 30 - a. Représentation du signal de marée correspondant à la composante semi-mensuelle ($A=1m$ et $T=15j$). b. Comparaison des profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage en période de vives eaux et mortes eaux pour un marais arrière-littoral mis en charge par la mer, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et le niveau marin moyen actuel. . 32

Figure 31 – Profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage pour un **marais arrière-littoral non mis en charge par la mer**, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et trois niveaux marins moyens : actuel, actuel + 1m, actuel + 2m. 33

Figure 32 – Profils piézométriques modélisés pour le site de Coudeville-Plage pour un **marais arrière-littoral mis en charge par la mer**, pour un aquifère de perméabilité homogène $K=10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, une recharge de 180mm/an et deux niveaux marins moyens : actuel et actuel + 1m..... 33

Figure 33 – Représentation d'un profil piézométrique et des conditions aux limites. 42

10. Table des tableaux

Tableau 1 :– Distance caractéristique de pénétration de l’onde de marée lc calculée pour différentes valeurs de perméabilité de l’aquifère et de période d’onde de marée, pour un aquifère ayant une porosité de 5% et une épaisseur de 10m.....	15
Tableau 2 – Atténuation de l’amplitude d’une onde de marée à une distance x de la côte, exprimée en fonction de la distance caractéristique de pénétration lc . L’atténuation de l’amplitude est exprimée comme le rapport de l’amplitude mesurée à la position x par rapport à l’amplitude à la mer.	15
Tableau 3 - Évolution projetée de la température moyenne à la surface du globe et de l’élévation du niveau moyen de la mer à l’échelle mondiale pour le milieu et la fin du XXIe siècle par rapport à la période de référence 1986-2005 [Pachauri et al., 2014].	18
Tableau 4 - Différence entre l’augmentation du niveau marin moyen et l’élévation du toit de nappe mesuré à une distance L de la côte, pour différentes valeurs de perméabilité de l’aquifère. La différence est exprimée en pourcentage de l’augmentation du niveau marin moyen.	21
Tableau 5: Evolution du rapport entre la hauteur d’eau dans la dune à un instant t par rapport à la hauteur d’eau initiale, en fonction du temps caractéristique de vidange τ	44

11. Annexe

11.1 Calcul analytique de la vidange d'une dune

Nous considérons la vidange d'une nappe phréatique abritée dans une dune. Le système est unidimensionnel (axe x) et symétrique par rapport à l'axe central de la dune, aussi le raisonnement n'est mené que sur une moitié de la dune. Nous négligeons les écoulements verticaux au sein de l'aquifère (hypothèse de Dupuit) Le profil de la hauteur du toit de nappe est parabolique :

$$h_x^2 = h_1^2 + \frac{h^2 - h_1^2}{L}x$$

où h_x est la hauteur d'eau à la position x , h_1 est la hauteur d'eau constante dans la zone de décharge basse de la dune, et h est la hauteur d'eau maximum dans la dune à la position $x=L$. Ce profil de hauteur de nappe est représenté dans la figure ci-dessous.

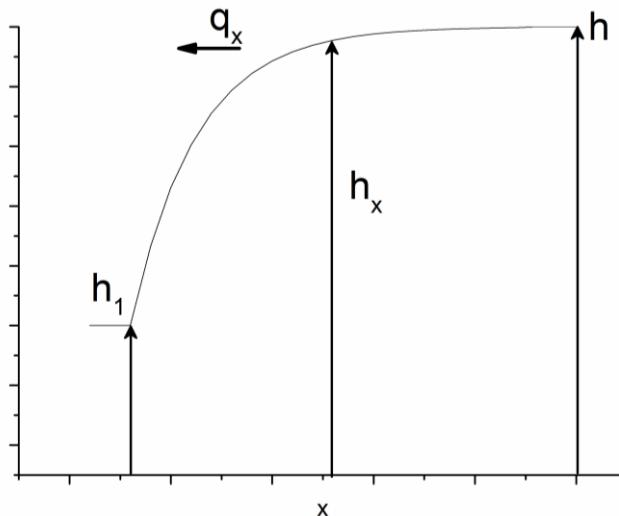


Figure 33 – Représentation d'un profil piézométrique et des conditions aux limites.

Le flux d'eau dans l'aquifère q_x est donné par la loi de Darcy en une dimension :

$$q_x = -Kh_x \frac{\partial h_x}{\partial x}$$

où K est la perméabilité de l'aquifère et $\frac{\partial h_x}{\partial x}$ est le gradient de charge selon x . q_x peut être réécrit sous la forme

$$q_x = -\frac{K}{2} \frac{\partial h_x^2}{\partial x}$$

$$q_x = -\frac{K}{2} \frac{h^2 - h_1^2}{L}$$

On note que q_x est indépendant de x pour garantir la conservation des flux. Dans le cas où $h > h_1$, les écoulements vont de la droite vers la gauche $q_x < 0$.

Nous cherchons maintenant à exprimer le volume d'eau dans l'aquifère à un instant donné :

$$V = \int_{x=0}^{x=L} \theta h_x(x) dx$$

où θ est la porosité de la dune. Cette équation se réécrit en injectant l'expression de h_x :

$$V = \theta \int_{x=0}^{x=L} \sqrt{h_1^2 + \frac{h^2 - h_1^2}{L} x} dx.$$

En factorisant par $\sqrt{\frac{h^2 - h_1^2}{L}}$:

$$V = \theta \sqrt{\frac{h^2 - h_1^2}{L}} \int_{x=0}^{x=L} \sqrt{x + L \frac{h_1^2}{h^2 - h_1^2}} dx.$$

Or, pour une variable a indépendante de x ,

$$\int \sqrt{(x+a)} dx = \left[\frac{2}{3} (x+a)^{3/2} \right]$$

L'expression du volume se réécrit donc :

$$\begin{aligned} V &= \theta \sqrt{\frac{h^2 - h_1^2}{L}} \cdot \left[\frac{2}{3} \left(x + L \frac{h_1^2}{h^2 - h_1^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right]_{x=0}^{x=L} \\ V &= \frac{2}{3} \theta L^{3/2} \sqrt{\frac{h^2 - h_1^2}{L}} \left[\left(1 + \frac{h_1^2}{h^2 - h_1^2} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{h_1^2}{h^2 - h_1^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \\ V &= \frac{2}{3} \theta L \sqrt{h^2 - h_1^2} \left[\left(1 + \frac{h_1^2}{h^2 - h_1^2} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{h_1^2}{h^2 - h_1^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right]. \end{aligned}$$

Dans le cas où $h \gg h_1$:

$$V = \frac{2}{3} \theta L h$$

La variation temporelle du volume est donnée par :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{2}{3} \theta L \frac{dh}{dt}$$

Cette variation de volume est égale au flux d'eau quittant l'aquifère par unité de temps, soit :

$$\frac{dV}{dt} = q_x$$

$$\frac{2}{3} \theta L \frac{dh}{dt} = -\frac{K}{2} \frac{h^2 - h_1^2}{L}$$

$$\frac{dh}{h^2 - h_1^2} = -\frac{3K}{4\theta L^2} dt$$

Par intégration sur le temps :

$$\begin{aligned} \int_0^t \frac{dh}{h^2 - h_1^2} &= -\frac{3K}{4\theta L^2} \int_0^t t \\ \left[-\frac{1}{h - h_1} \right]_0^t &= -\frac{3K}{4\theta L^2} t \\ \frac{1}{h(0) - h_1} - \frac{1}{h(t) - h_1} &= -\frac{3K}{4\theta L^2} t \\ \frac{1}{h(t) - h_1} &= \frac{1}{h(0) - h_1} + \frac{3K}{4\theta L^2} t \\ h(t) - h_1 &= \frac{1}{(h(0) - h_1)^{-1} + \frac{3K}{4\theta L^2} t} \\ h(t) - h_1 &= \frac{h(0) - h_1}{1 + \frac{3K(h(0) - h_1)}{4\theta L^2} t}. \end{aligned}$$

L'approximation de la solution analytique s'écrit ainsi :

$$h(t) - h_1 = \frac{h(0) - h_1}{1 + \frac{t}{\tau}}$$

où τ est le temps caractéristique de vidange :

$$\tau = \frac{4\theta L^2}{3K(h(0) - h_1)} = \frac{4L^2}{3D}$$

avec D la diffusivité de l'aquifère :

$$D = \frac{K(h(0) - h_1)}{\theta}.$$

Physiquement, le temps caractéristique τ correspond au temps au bout duquel la hauteur d'eau initiale maximum dans la dune a été divisée par deux. L'évolution de la hauteur d'eau en fonction de τ dans la dune est illustrée dans le tableau suivant :

t	0	τ	2τ	3τ	5τ	10τ
$\frac{h(t) - h_1}{h(0) - h_1}$	1	0.5	0.33	0.25	0.17	0.09

Tableau 5: Evolution du rapport entre la hauteur d'eau dans la dune à un instant t par rapport à la hauteur d'eau initiale, en fonction du temps caractéristique de vidange τ .

11.2 Calcul analytique de la propagation du niveau marin moyen

Nous considérons un aquifère unidimensionnel de longueur L . Cet aquifère possède une limite à charge imposée $h(x = 0) = h_1$ correspondant à la mer, et une limite à flux nul à son autre extrémité $q(x = L) = 0$. En faisant l'approximation que les flux verticaux sont négligeables (hypothèse de Dupuit), le flux d'eau dans l'aquifère q est donné par la loi de Darcy en une dimension :

$$q = -Kh \frac{dh}{dx} = -\frac{K}{2} \frac{dh^2}{dx}$$

où K est la perméabilité de l'aquifère. La variation du flux selon x correspond à la recharge R :

$$\frac{dq}{dx} = R$$

d'où

$$\frac{d^2h^2}{dx^2} = -\frac{2R}{K}.$$

Cette équation se réécrit par intégration :

$$\begin{aligned} \frac{dh^2}{dx} &= -\frac{2R}{K}x + a \\ h^2 &= -\frac{R}{K}x^2 + ax + b. \end{aligned}$$

Avec a et b des constantes d'intégration. En prenant en compte la limite à charge imposée au niveau de la mer $x=0$:

$$\begin{aligned} h^2(x = 0) &= h_1^2 \\ b &= h_1^2. \end{aligned}$$

En prenant en compte la limite à flux nul en $x=L$:

$$q(x = L) = 0$$

$$\left. \frac{K}{2} \frac{dh^2}{dx} \right|_{x=L} = 0$$

$$a = \frac{2RL}{K}.$$

L'équation de la hauteur d'eau dans l'aquifère est donc :

$$h = \sqrt{-\frac{R}{K}x^2 + \frac{2RL}{K}x + h_1^2}.$$

11.3 Guide d'utilisation du modèle de Bréville-sur-Mer

Le modèle hydrogéologique du site de Bréville-sur-Mer a été développé sur FREEWAT, qui est une interface liant le logiciel de modélisation hydrogéologique MODFLOW de l'USGS au logiciel d'information géographique QGIS. FREEWAT, MODFLOW et QGIS sont des logiciels libres. Ci-dessous, nous détaillons étape par étape l'installation des logiciels puis la mise en œuvre du modèle. Pour plus d'information sur FREEWAT, nous référons à la documentation (guide installation, guide utilisateur, tutoriaux) mise à disposition après inscription gratuite sur le [site internet dédié](#) (en anglais).

11.3.1 Installation des logiciels

Le texte ci-dessous est une version traduite et synthétique du guide d'installation officiel de FREEWAT en anglais (Version 1.0, 30 Septembre 2017).

11.3.1.1 Installation de QGIS

La première étape avant l'utilisation de FREEWAT est d'installer le logiciel QGIS. Il est fortement recommandé de télécharger la dernière version stable de QGIS, qui est actuellement la version 2.14 *Essen*, ou les versions suivantes. QGIS est téléchargeable à [cette adresse](#), où se trouve également toute la documentation complémentaire. L'exécutable d'installation de QGIS 2.14 *Essen* est fourni dans l'archive fournie par l'OSUR Hydrogeologie_Breville_OSUR_2017 dans le dossier installs.

Attention, pour éviter tout problème lors de l'installation de FREEWAT, il est préférable de n'avoir QU'UNE SEULE VERSION DE QGIS installée. Pour la même raison, il est fortement déconseillé d'avoir QGIS et ArGIS installés ensemble sur le même ordinateur.

11.3.1.2 Installation du plugin FREEWAT

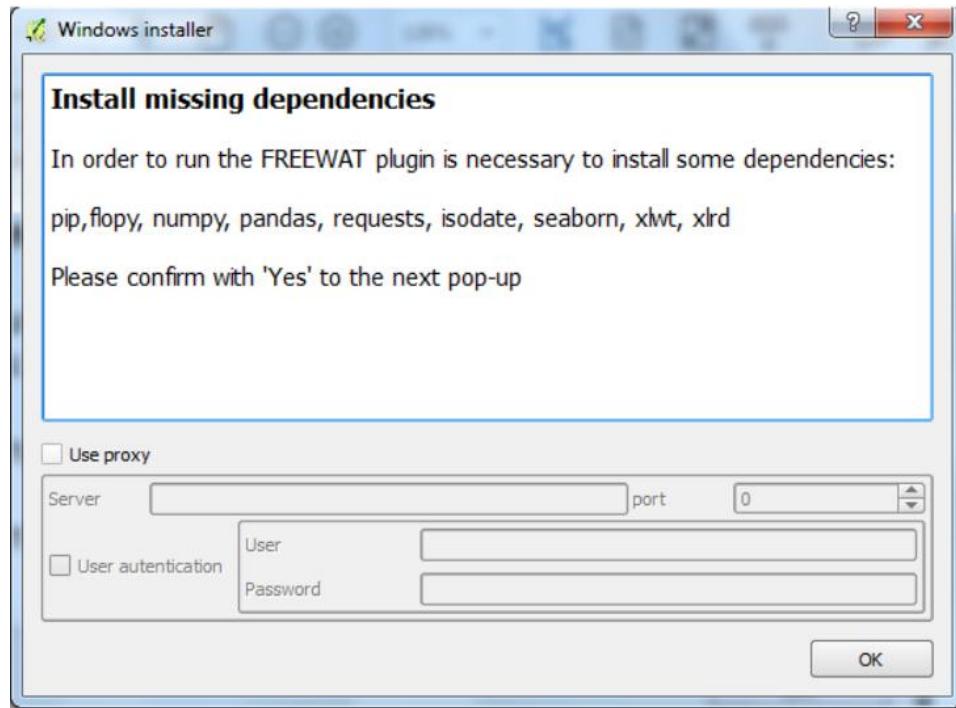
FREEWAT est téléchargeable à [cette adresse](#) après inscription sur le site. Vous y trouverez également le guide d'installation officiel (en anglais) pour tout besoin d'information complémentaire. L'archive téléchargée est également fournie dans l'archive fournie par l'OSUR Hydrogeologie_Breville_OSUR_2017\installs.

Sur tous les systèmes d'exploitation, lorsque QGIS est utilisé pour la première fois, un dossier .qgis2 est créé. Sur Windows, ce dossier se trouve à C:\Users\your_name\.qgis2. Sur Linux, ce dossier se trouve dans /home/user/.qgis2.

Attention, éviter les espaces et les caractères spéciaux (accents notamment) dans les chemins de dossier.

- **Etape 1.** Pour installer le plugin FREEWAT, vous devez extraire le dossier freewat depuis l'archive téléchargée dans C:\Users\your_name\.qgis2\python\plugins (pour Windows) ou C:/Users/your_name/.qgis2/python/plugins (pour Linux). Parfois le dossier plugins peut ne pas exister. Dans ce cas vous pouvez simplement le créer (son nom doit être exactement plugins, en lettres minuscules).
- **Etape 2.** Lancez QGIS.

- **Etape 3.** La fenêtre d'installation suivante apparaît, indiquant qu'un certain nombre de librairies ('dependencies') sont manquantes et doivent être installées :



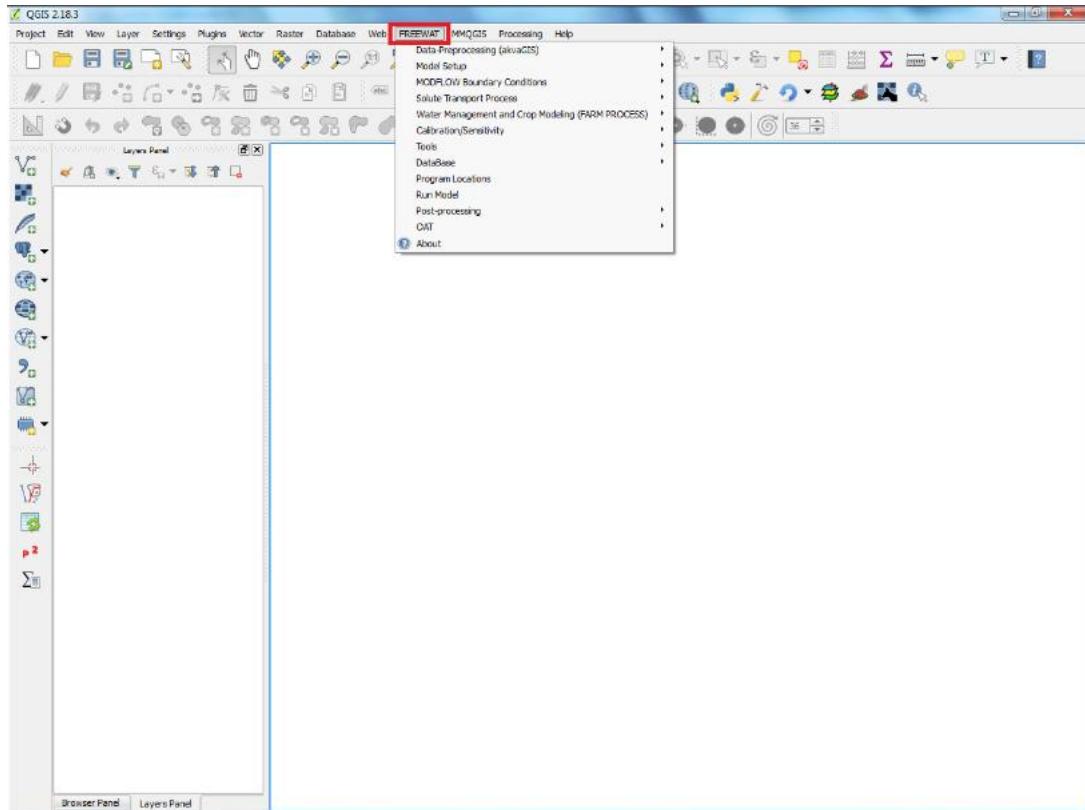
- **Etape 4.** Cliquez sur OK pour commencer l'installation automatique. Vous devez être connecté à Internet pour que le téléchargement des librairies s'effectue. Plusieurs fenêtres vont apparaître et disparaître au fur et à mesure de l'installation des librairies :

```
C:\Windows\System32\cmd.exe
Collecting pandas==0.18.1
  C:\PROGRA~1\QGISSE~1\apps\Python27\lib\site-packages\pip\_vendor\requests\packages\urllib3\util\ssl_.py:318: SNIMissingWarning: An HTTPS request has been made, but the SNI (Subject Name Indication) extension to TLS is not available on this platform. This may cause the server to present an incorrect TLS certificate, which can cause validation failures. You can upgrade to a newer version of Python to solve this. For more information, see https://urllib3.readthedocs.org/en/latest/security.html#snimissingwarning.
    SNIMissingWarning
  C:\PROGRA~1\QGISSE~1\apps\Python27\lib\site-packages\pip\_vendor\requests\packages\urllib3\util\ssl_.py:122: InsecurePlatformWarning: A true SSLContext object is not available. This prevents urllib3 from configuring SSL appropriately and may cause certain SSL connections to fail. You can upgrade to a newer version of Python to solve this. For more information, see https://urllib3.readthedocs.org/en/latest/security.html#insecureplatformwarning.
    InsecurePlatformWarning
  Downloading pandas-0.18.1-cp27-cp27m-win_amd64.whl (6.2MB)
    99% [=====] : 6.1MB 6.4MB/s eta 0:00:01
```

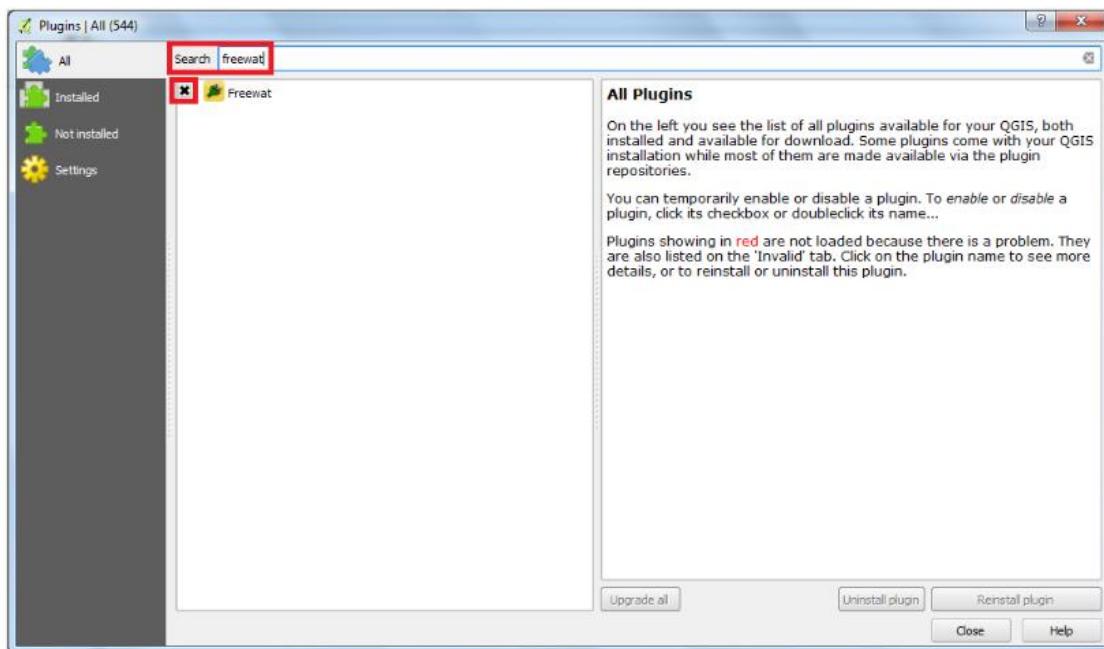
Attention, l'installation de chaque librairie demande d'être autorisée, une autorisation administrateur sera nécessaire pour chaque installation.

11.3.2 Accéder au plugin FREEWAT

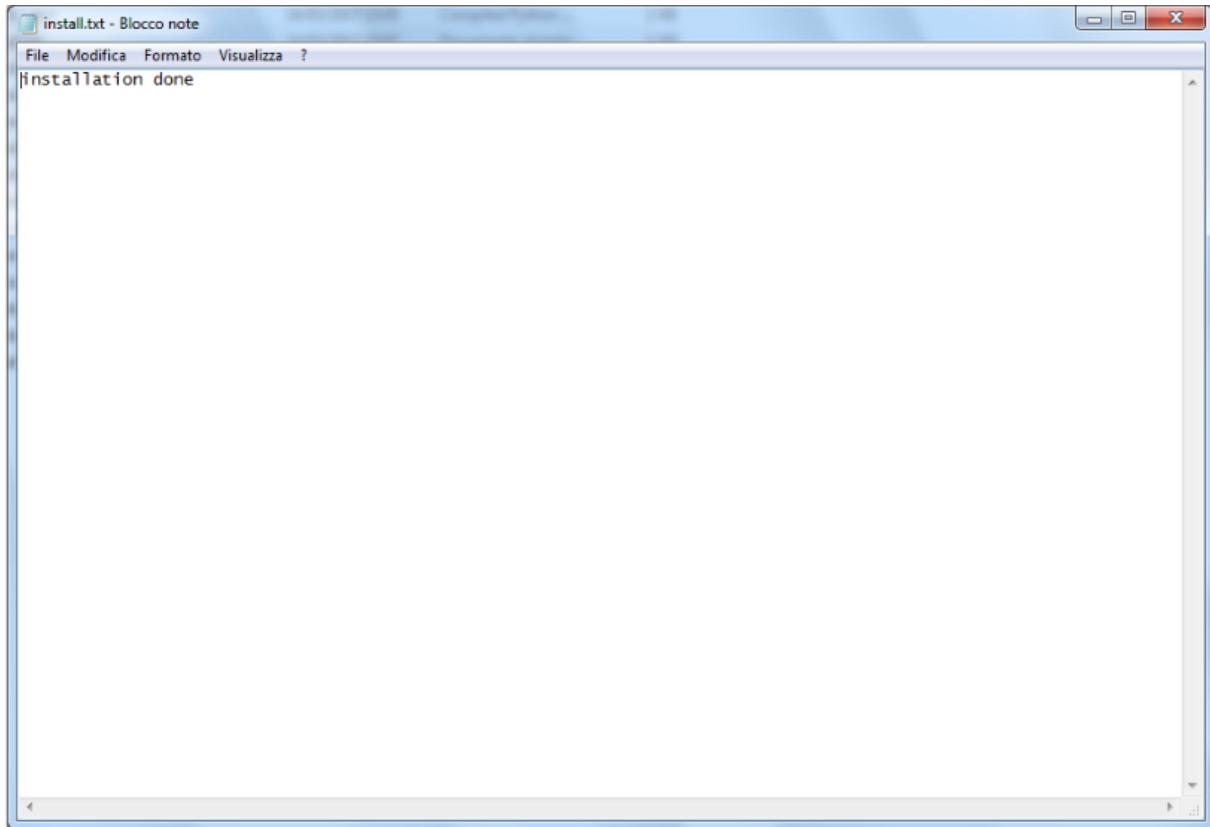
Une fois QGIS et les librairies complémentaires correctement installées, lancez QGIS. Un onglet FREEWAT devrait apparaître dans la barre des tâches de QGIS:



Si ce n'est pas le cas, allez dans *Plugins -> Manage and Install Plugins*, tapez FREEWAT dans la barre de recherche et cocher la case correspondante pour activer le plugin, comme sur la figure ci-dessous :



Attention, il peut arriver que, même si toutes les librairies ont été correctement installées (et que l'onglet FREEWAT apparaît dans la barre d'outils de QGIS), la procédure d'installation se relance à chaque redémarrage de QGIS. Dans ce cas, un fichier texte (bloc-notes sous Windows) install.txt doit être créé manuellement dans C:\Users\your_name\.qgis2\python\plugins\freewat\install ou /home/user/.qgis2/python/plugins. Ce fichier texte doit seulement contenir la phrase installation done.



Si les problèmes d'installation persistent, consulter la procédure d'installation manuelle décrite dans le guide d'installation officiel.

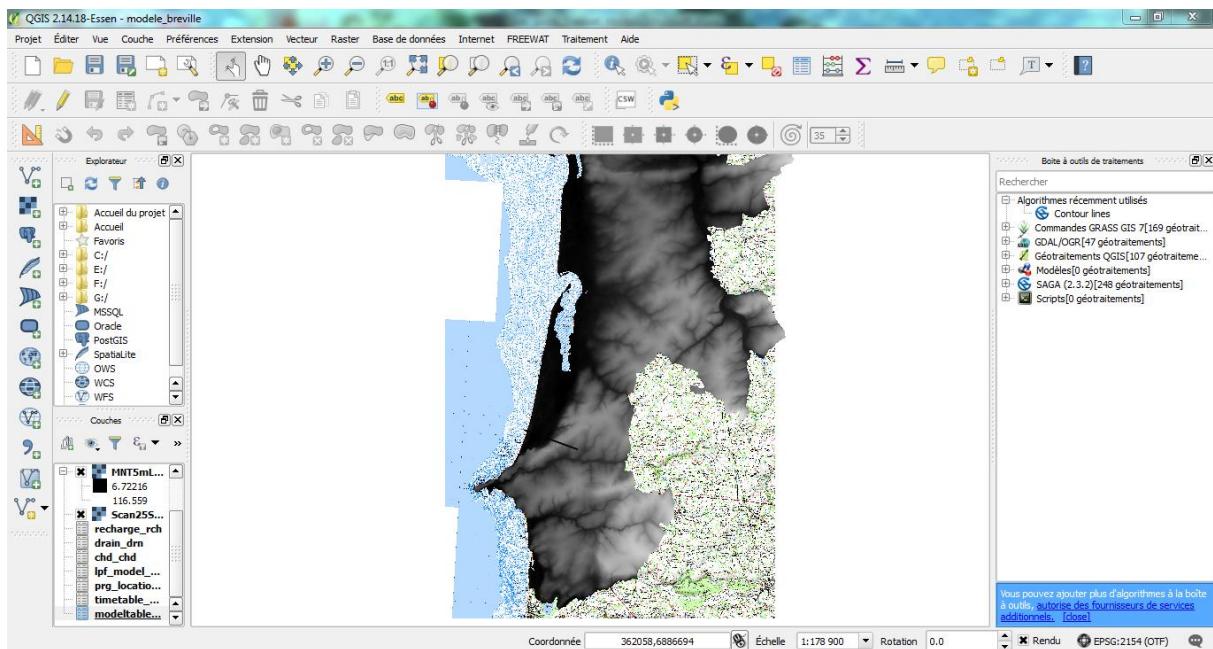
11.3.3 Utilisation du modèle de Bréville-sur-Mer

11.3.3.1 Ouverture du projet QGIS

Ouvrez le projet QGIS dans l'archive du projet :

Hydrogeologie_Breville_OSUR_2017\modele_breville\new_Breville.qgs.

La fenêtre suivante apparaît :



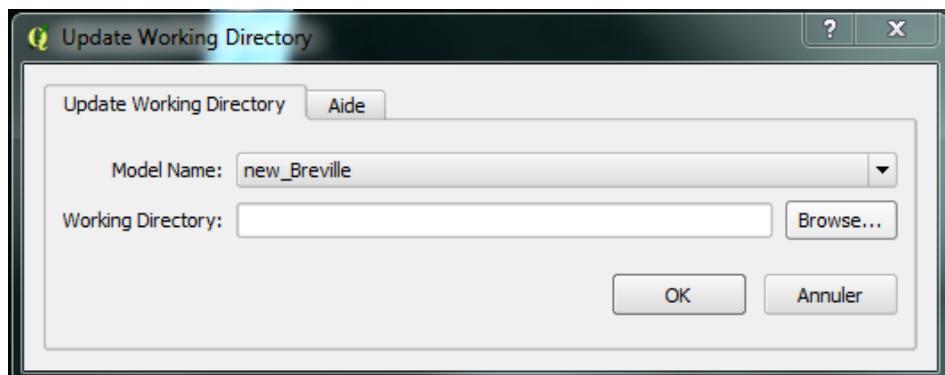
Notez la représentation du MNT en niveau de gris dans la fenêtre centrale, ainsi que la carte IGN et la coupe du modèle au niveau de Bréville-sur-Mer. Vous pouvez choisir d'afficher ou non chacun de ces éléments en cochant ou décochant la case correspondante dans le menu en bas à gauche. Dans ce menu est également listé l'ensemble des données d'entrée du modèle notamment :

- layer_1 : propriétés physique de l'aquifère (topographie, épaisseur, perméabilité...) ;
- recharge_rch : précipitations ;
- seal_level_chd : location et niveau de la mer ;
- timetable_new_Breville : périodes de temps simulées (ici, 32 périodes de 15 jours chacunes).

Nous référons aux tutoriaux FREEWAT pour une explication complète de ces données.

11.3.3.2 Mettre à jour le chemin de dossier du modèle

Pour mettre à jour le chemin du dossier utilisé par FREEWAT, allez dans l'onglet FREEWAT -> Model Setup -> Update Working Directory. La fenêtre suivante apparaît :



Utilisez le bouton ‘Browse...’ pour chercher et sélectionner le dossier Hydrogeologie_Breville_OSUR_2017\modele_breville. Cliquez sur OK.

11.3.3.3 Mettre à jour le chemin de dossier vers MODFLOW

Sur la fenêtre de principale, dans le menu en bas à gauche, faites un clic droit sur ‘prg_location_new_Breville’ puis sélectionnez dans le menu ‘Ouvrir la table d’attributs’. La fenêtre suivante apparaît :

	id	code	executable
0	1	MF2005	C:/Users/BABEY/...
1	2	MFLOWHM	
2	3	MF-NWT	
3	4	MT3DMS	
4	5	MT3D-USGS	
5	6	SEAWAT	
6	7	UCODE	
7	8	ZONE	
8	9	MODPATH	

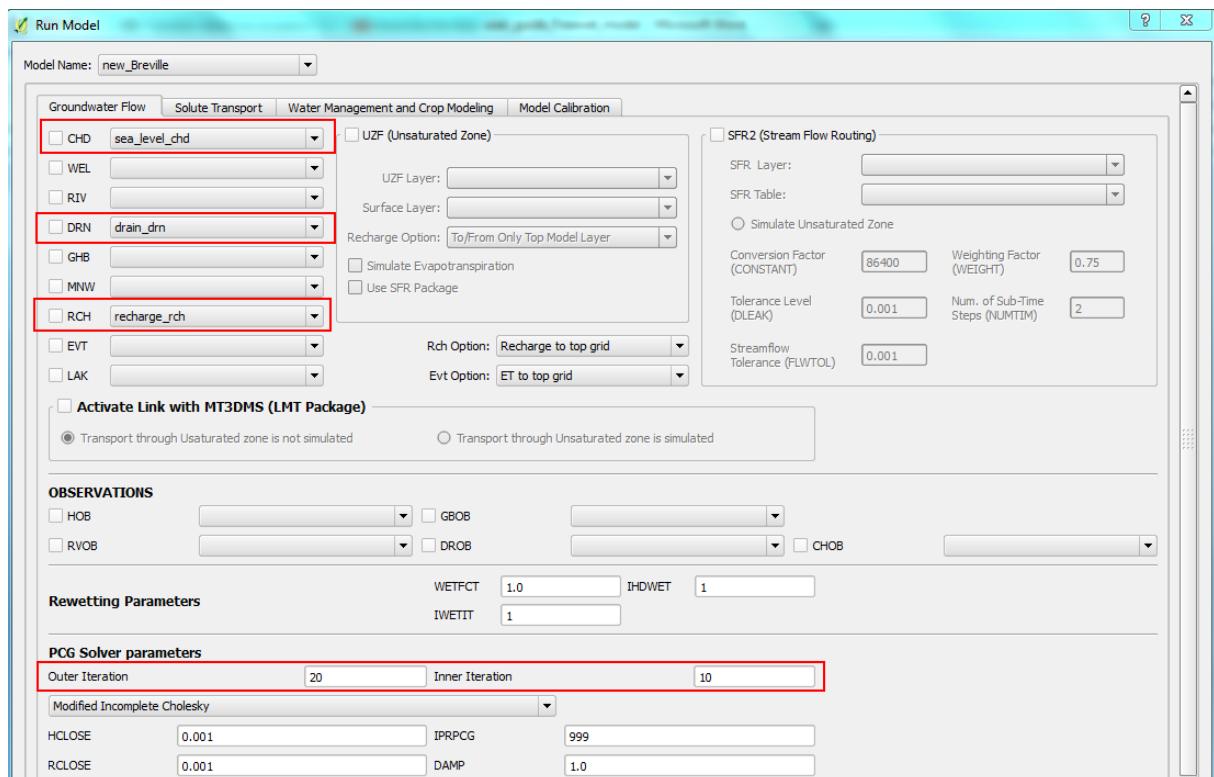
Cette fenêtre permet de renseigner l'emplacement des exécutables des différents logiciels de modélisation hydrogéologique, dont MODFLOW 2005. Cliquez sur le crayon en haut à gauche pour activer le mode édition. Puis double-cliquez sur la case de la colonne ‘executable’ à droite de ‘MF2005’. Cliquez ensuite sur le bouton ‘...’ pour sélectionnez l'exécutable MODFLOW se trouvant à Hydrogeologie_Breville_OSUR_2017\bin\mf2005.

Attention, une fois l'exécutable sélectionné, cliquez une fois sur n'importe quelle case du tableau pour mettre à jour le chemin de fichier. Vérifiez que le nouveau chemin de fichier apparait dans la case.

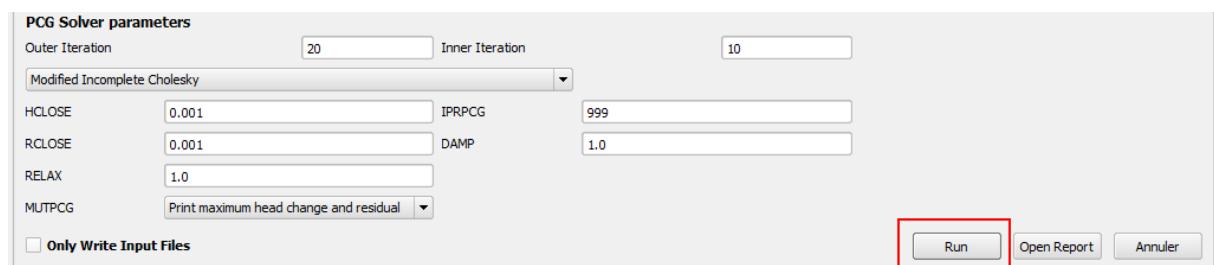
Cliquez ensuite sur la disquette en haut à gauche de la fenêtre pour sauvegarder vos modifications, puis désactivez le mode édition en cliquant sur le crayon en haut à gauche. Fermez ensuite la fenêtre.

11.3.3.4 Réaliser une simulation avec FREEWAT

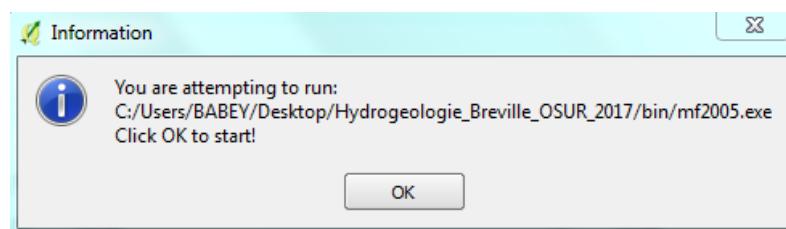
Pour réaliser une simulation avec FREEWAT, allez dans FREEWAT -> Run Model. La fenêtre suivante apparaît :



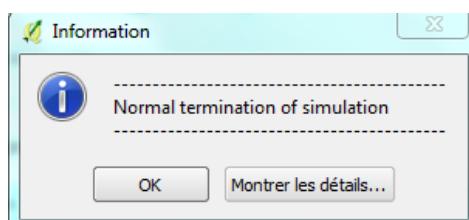
Cochez les cases ‘CHD’, ‘DRN’ et ‘RCH’, puis changez la valeur de la case ‘Outer Iteration’ à 10000 et de la case ‘Inner Iteration’ à 3000. Faites déroulez la fenêtre vers le bas et cliquez sur le bouton ‘Run’ :



La fenêtre suivante apparaît, parfois au bout de plusieurs secondes :

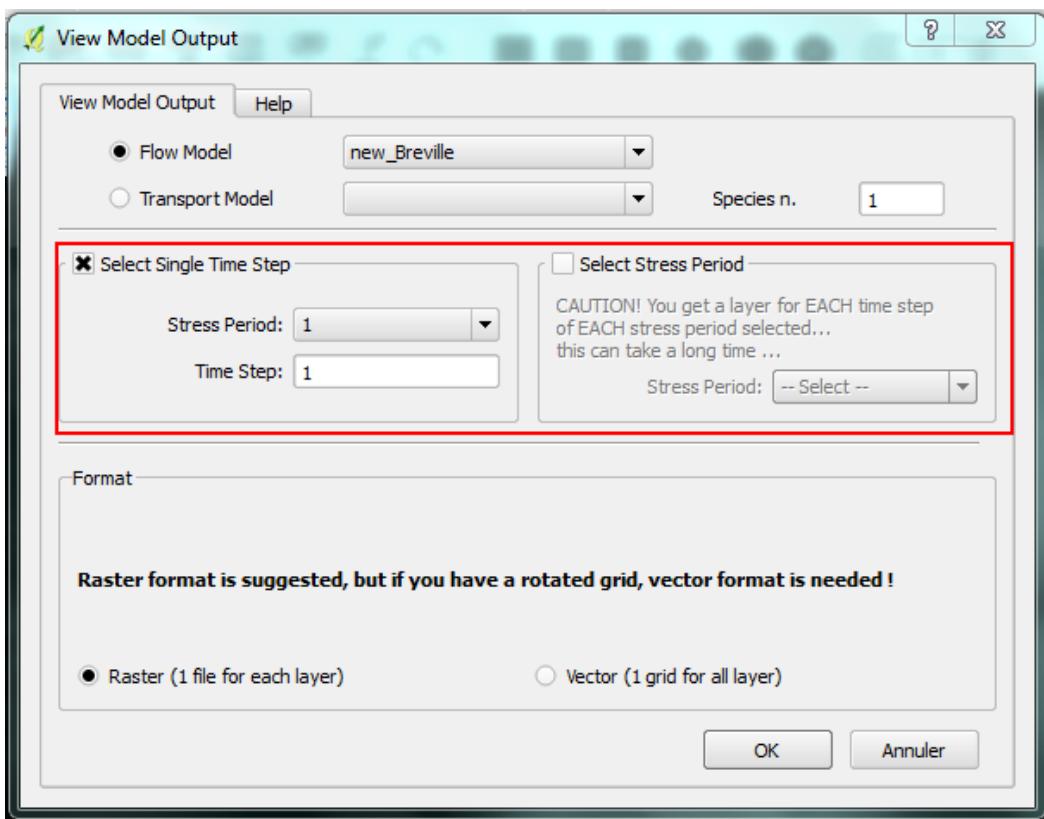


Cliquez sur ‘OK’. Une fenêtre noire console apparaît et reste affichée le temps de la durée de la simulation. Finalement, la fenêtre suivante apparaît indiquant le succès de la simulation:



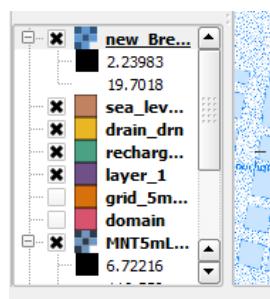
11.3.3.5 Exploiter les résultats de simulation FREEWAT

Les résultats de simulation sous format brut se trouvent dans le dossier du modèle, dans le fichier new_Breville.list, ouvrable avec un éditeur de texte (bloc-notes sous Windows). Ce fichier indique les hauteurs d'eau estimées dans la nappe en chaque cellule à chaque pas de temps. Les résultats sont également visualisables sous QGIS pas de temps par temps. Pour cela, allez dans FREEWAT -> Post-processing -> View Model Output. La fenêtre suivante apparaît :

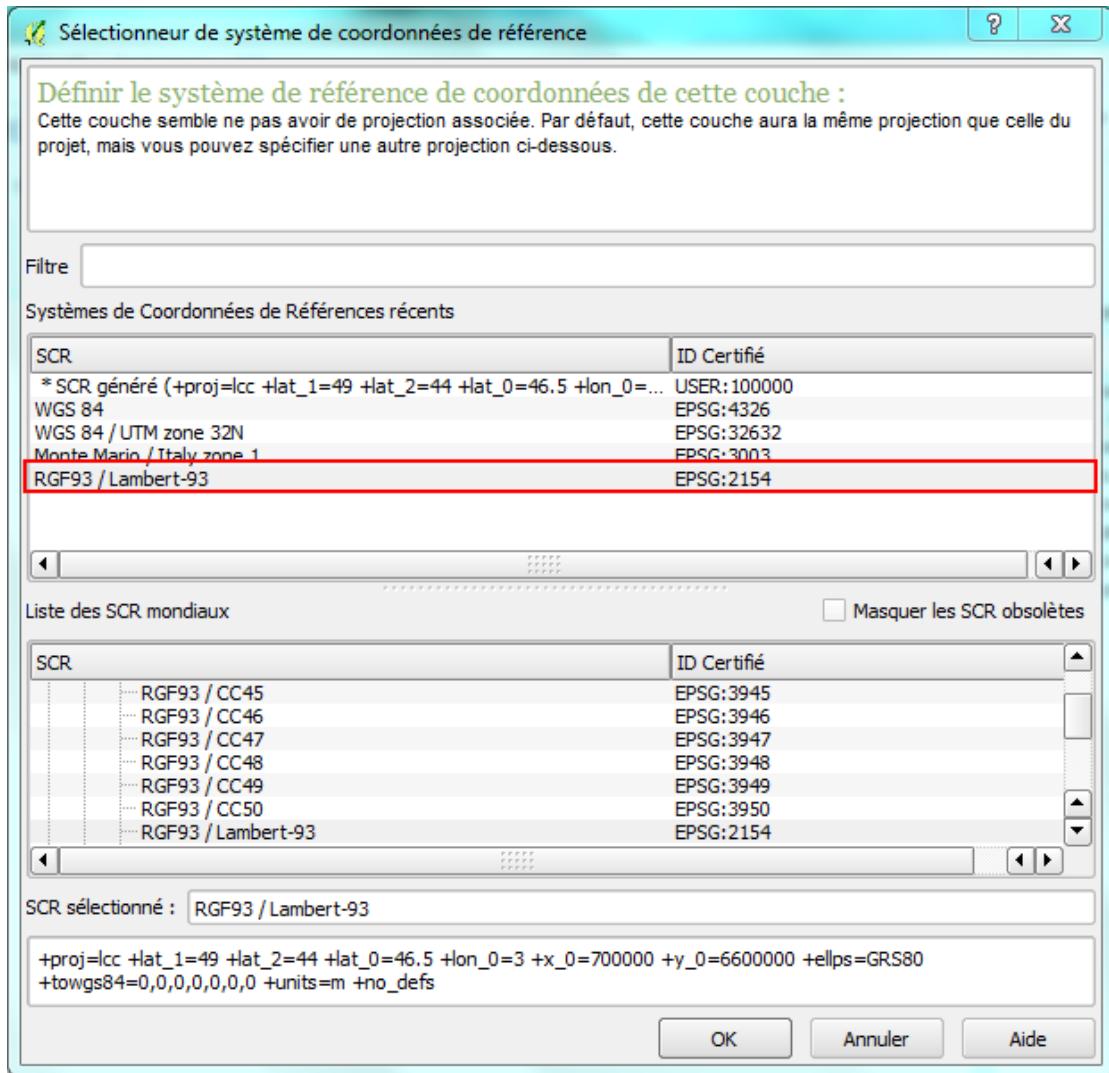


Utilisez le menu ‘Select Single Time Step’ pour sélectionner la date du résultat à visualiser. Indiquez 33 pour la ‘Stress Period’ et 30 pour ‘Time Step’, correspondant à la valeur calculée à la fin de la simulation (après 33×15 jours=495 jours). Cliquez sur ‘OK’. Un message d’alerte apparaît indiquant que le système de coordonnée des résultats n’est pas défini, cliquez sur OK.

De retour sur la fenêtre principale de QGIS, vous notez qu’une nouvelle donnée est apparue dans le menu en bas à gauche nommée ‘lay_1_sp_33_ts_30’ :



Il s'agit des résultats de simulation sélectionnés sous format raster, indiquant la hauteur d'eau dans la nappe. Tout d'abord, il s'agit de renseigner le système de coordonnées de ces résultats. Faites un clic droit sur ‘lay_1_sp_33_ts_30’, puis sélectionnez dans le menu ‘Définir le SCR de cette couche’. La fenêtre suivante apparaît :



Sélectionnez le système de coordonnées ‘RGF93 / Lambert 93’, puis cliquez sur OK.

De retour sur la fenêtre principale de QGIS, décochez toutes les cases dans le menu en bas à gauche à l'exception de ‘lay_1_sp_33_ts_30’, et zoomez pour mieux visualiser les résultats, très basiques dans ce cas, correspondant aux altitudes en mètres du toit de la nappe :

