

Modélisation d'oscillations forcées de nappes de plages en hydrodynamique côtière: rôle de la zone non saturée

M. SABBAR¹, K. ALASTAL^{2,3}, M. CHAGDALI¹, R. ABABOU²

¹ Faculté des Sciences de Casablanca - Ben M'Sik, LPPPC Casablanca, Maroc – Email : sabbar.mec@gmail.com

² Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Université de Toulouse, IMFT : 1 Allée Camille Soula, 31400 Toulouse, France – Email : ababou@imft.fr

³ The Islamic University of Gaza, Dept. of Civil Engineering, P.O. Box 108, Rimal, Gaza, Palestine – Email : kh.astal@gmail.com

RÉSUMÉ. – Ce travail concerne l'étude des effets des marées et des vagues à l'intérieur d'une plage de sable, près de la zone de swash. On s'intéresse ici à l'étude du mouvement vertical de l'eau en considérant les effets d'une submersion périodique de la surface de la plage sous l'effet des vagues dans la zone de swash. Le modèle physique est représenté par une colonne de sable partiellement saturée / partiellement insaturée, et très fortement transitoire. Nous présentons les résultats de deux expériences numériques sur deux colonnes verticales de sable de hauteurs différentes (deux profondeurs de nappes différentes).

Mots-clés : Écoulements oscillatoires ; Interaction vagues – plages ; Zone de swash (jet de rive)

Modeling of forced oscillations in a coastal sandy beach: role of the unsaturated zone

ABSTRACT. – This work concerns the effects of tides and waves inside a sandy beach, near the swash zone. In this paper, we focus on forced oscillations in the unsaturated beach under various hypotheses. The sand column is submerged periodically at the top. It is partially saturated / partially unsaturated, and highly transient. The vertical movement of water in the sand column is studied. The effect of the periodic arrival of waves in the “swash” zone is represented by a periodic pressure forcing at the top of the column. The results are presented for two different heights of the column, corresponding to two different depths of the water table.

Key-words: Oscillatory flows; Numeric modeling; Swash zone.

I. INTRODUCTION

Les écoulements souterrains en zone côtière influencent le transport de sédiments et les processus morphologiques (érosion et dépôt) notamment dans la zone de jet de rive [Jeng *et al.* 2005]. Les eaux souterraines côtières contrôlent aussi les processus d'infiltration, de fixation et de remobilisation des contaminants au voisinage de la surface libre de la nappe côtière [Chen *et al.* 2011]. Les écoulements souterrains affectent la stabilité des structures bâties sur des sols sableux près des plages [Nielsen 1990]. Les recherches dans ce domaine sont motivées par les nombreuses questions qui se posent en vue de répondre aux problèmes et défis environnementaux en zone côtière, questions que nous allons maintenant examiner brièvement.

Tout d'abord, dans la zone côtière, on peut distinguer deux types de forçages oscillatoires d'origine hydrodynamique: (i) les phénomènes basse fréquence ou ondes longues (la marée, les seiches ou les marées d'équinoxes) ; et (ii) les phénomènes haute fréquence ou ondes courtes (les vagues déferlantes, le jet de rive ou « swash »). La photographie de la figure 1 illustre les écoulements complexes sur la plage dans la zone de swash. On remarque la zone de plage sèche à gauche, la zone intermédiaire récemment humectée par le jet de rive, et la zone submergée (sous faible tirant d'eau) à droite de la photo.

Pour étudier ces phénomènes, on considère ici un modèle physique constitué d'une colonne de sable partiellement

saturé (i.e. saturé/insaturé) positionnée sur la zone de swash (Figure 2). Le régime d'écoulement dans cette colonne de sable est fortement transitoire (oscillatoire).

Dans cet article, on se focalise donc sur l'étude numérique de l'effet de la submersion périodique pour une colonne verticale de sable située au droit de la zone de swash, comme indiqué Figure 2.

Cependant, ce travail s'insère plus généralement dans le cadre d'études expérimentales, numériques et théoriques sur les effets des marées et des vagues à l'intérieur d'une plage de sable. Ces études concernent d'une part les effets des marées (« tides » en anglais, d'où l'adjectif « tidal » utilisé un peu plus loin) suffisamment loin de la zone de swash, et d'autre part, les effets des vagues dans la zone de swash (jet de rive). Les résultats expérimentaux sur les oscillations tidales de la nappe de plage (et de la zone non saturée au-dessus de la nappe) ont été développés à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (Ababou, Alastal, Astruc) ; ces expérimentations ont été présentées partiellement par Alastal *et al.* 2010 & 2011, et dans la thèse de Alastal 2012.

En résumé, on peut donc distinguer deux types d'oscillations forcées, que notre équipe étudie sous diverses hypothèses :

— Etude du mouvement vertical de l'eau sous forçage tidal, à fréquence relativement faible (période des marées). L'effet des marées est représenté par une pression sinusoidale oscillante imposée *au bas* de la colonne de sable, sous la surface libre de la nappe de plage. La colonne étudiée



Figure 1 : Vagues et jet de rive dans la zone de swash. Remarquer 3 zones : plage sèche en haut à gauche ; plage humectée en bas à gauche ; jet de rive à droite. [Photo: Maki Akiyama 2011 ; disponible publiquement in :Wikipedia (téléchargé de Wikipedia en 2013)].

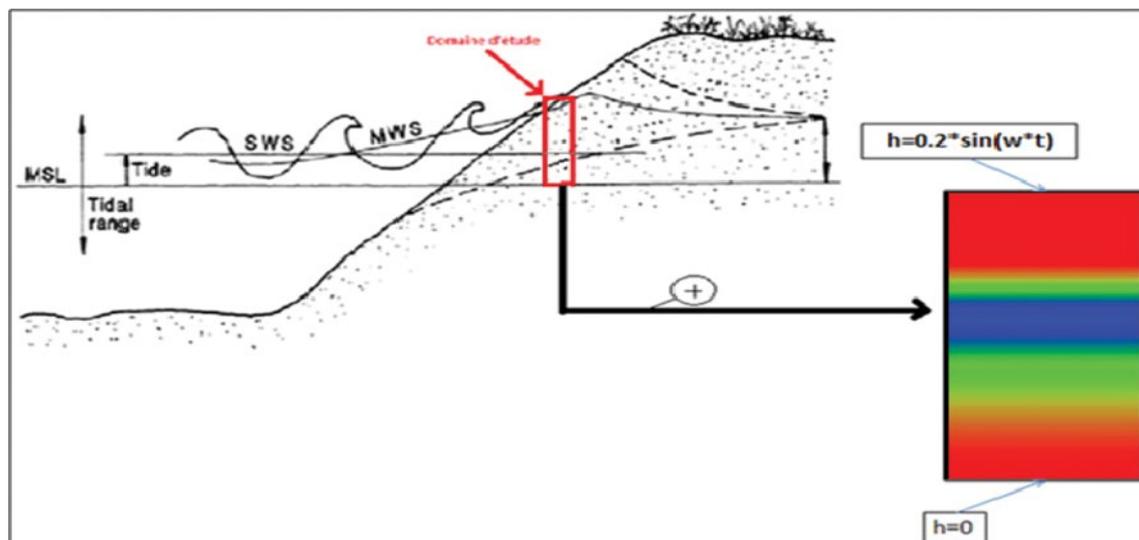


Figure 2 : Représentation du modèle physique et numérique de la colonne verticale. La zone de plage encadrée en rouge représente le domaine d'étude, une colonne verticale de sable positionnée dans la zone de swash et limitée inférieurement par la nappe de plage. La face supérieure de la colonne est soumise à un forçage périodique (submersions/retraits) dû au mouvement de va et vient des vagues. Ce forçage sera représenté numériquement par une condition limite de pression oscillatoire à la surface de la colonne de sable. Dans l'encadré en bas à droite, la colonne est représentée plus en détail, avec par exemple une condition de pression $h(t) = 0.2 \sin(\omega t)$ [mètres] imposée en surface. Le code de couleur illustre la répartition des teneurs en eau à un instant donné (le profil peut être partiellement saturé ou non saturé). La condition limite inférieure est $h = 0$ (surface libre de la nappe de plage). La variable « h » est la pression relative par rapport à la pression atmosphérique, exprimée en hauteur d'eau.

contient une zone saturée en bas et une zone non saturée en haut [Alastal *et al.* 2010 & 2011]. On montre qu'il existe une fréquence caractéristique pour laquelle les effets non linéaires (capillaires) sont maximisés : voir Alastal 2012 pour plus de détails.

— Etude du mouvement vertical de l'eau sous les effets d'une submersion périodique de la plage, à fréquence relativement élevée correspondant au rythme d'arrivée des vagues dans la zone de swash (jet de rive). Dans ce cas, le

« forçage » est obtenu en imposant une humectation ou une submersion périodique à la surface du sable, i.e., en imposant une condition limite oscillatoire en haut de la colonne.

Dans le cadre de cette seconde approche, objet de cet article, les oscillations forcées par le haut dans la zone de swash sont représentées par une pression oscillatoire à fréquence élevée imposée en haut de la colonne, tandis que la surface libre de la nappe est fixée égale au niveau moyen de la mer. On fait coïncider le bas de la colonne de calcul avec

le niveau moyen de la mer ; la condition limite au bas de la colonne est donc une pression relative nulle. En ce qui concerne la condition imposée à la surface de la plage, on peut imaginer différents types de contrôle de cette condition limite supérieure. Dans le présent travail, cette condition limite correspond à des cycles de submersion/suction, mais elle pourra aussi correspondre à des cycles de submersion/drainage, ce qui fait l'objet d'un autre travail en cours de réalisation.

Les simulations numériques sont réalisées à l'aide du code de calcul BIGFLOW, amélioré pour traiter spécifiquement ce type de problème transitoire à conditions limites temporellement variables [Alastal *et al.* 2010]. Le mouvement de l'eau dans la colonne de sable est analysé en termes des profils numériques de pression d'eau $h(z,t)$ et de teneur en eau $\theta(z,t)$, ou encore, de signaux numériques comme le flux d'eau vers la nappe $q_z(t)$. Pour une position donnée « z », l'état de saturation du sable peut changer de saturé ($\theta = \theta_{SAT}$) à insaturé ($\theta < \theta_{SAT}$). On s'intéresse aussi aux oscillations verticales du front de saturation, qui forme une « surface libre inverse » au comportement oscillatoire ou intermittent dû à la submersion périodique : étude de l'évolution, apparition, et disparition de l'iso-surface de saturation.

En résumé, nous étudions la submersion périodique de la colonne, en adoptant, par souci de simplification, une condition périodique de pression à la surface de la plage (alternant lame d'eau et mise en suction), et un niveau moyen de nappe fixé. Cela permet quand même de calculer, par exemple, la dynamique du flux vers cette nappe dû au swash. Des techniques de traitement du signal utilisant des fonctions de corrélation temporelles croisées, et des spectres croisés de fréquence, ont également été mises en œuvre dans nos travaux, et on envisage l'extension de ces techniques pour analyser les résultats numériques issus de la présente étude [Ababou *et al.* 2012].

On verra dans la suite que le forçage harmonique imposé en haut de la colonne de sable (donc à la surface de la plage dans la zone de swash) a des effets complexes sur le débit d'eau dans la colonne. Cela est dû à la non-linéarité de l'équation de Richards insaturée, avec un terme non linéaire de diffusion capillaire, et un terme gravitationnel non linéaire. Les oscillations saturées/insaturées de l'eau dans la colonne de sable vont donc dépendre non linéairement de la fréquence et des propriétés capillaires du matériau de la plage (appelé ici « sable »).

II. SIMULATION NUMÉRIQUES ET RÉSULTATS

Nous avons réalisé deux expériences numériques portant sur deux colonnes verticales de sable de hauteurs différentes (donc deux profondeurs de nappes différentes). Les données de hauteur sont $L = 0.20$ m pour le test 1, et $L = 1$ m pour le test 2.

II.1. Conditions de calcul numérique

Le « forçage » est obtenu en imposant un mouillage périodique de la surface du sable, ce qui correspond à une condition limite de pression harmonique en surface, de type $h(t) = 0 + A \sin(\omega t)$, avec une fréquence angulaire ω [rad/s], correspond à une période $T = 2\pi/\omega$ (on verra que $T = 20$ s dans nos tests numériques), et une amplitude « A » (nous prendrons une forte amplitude A de l'ordre de 0.20 m). Noter que la variable « h » est définie par $h = (p - p_{ATM})/\rho g$;

elle représente la pression interstitielle relativement à la pression de l'air, exprimée en mètres équivalent de hauteur d'eau, et l'on a : $h < 0$ en milieu non saturé ; $h > 0$ en milieu saturé. La surface du sable est donc soumise périodiquement à des cycles submersion / désaturation.

Enfin, pour simplifier le problème, nous supposons que la surface inférieure de la colonne de calcul coïncide avec le niveau moyen de la mer, ce qui implique l'existence d'une nappe libre fixée en bas de la colonne. Ceci revient à imposer sur la face inférieure de la colonne une pression relative nulle : $h = 0$ ($p = p_{ATM}$) en $z = L$ (si on désigne la profondeur par « z »). On néglige donc les variations du niveau moyen de la mer. Cette simplification semble acceptable vu que le temps caractéristique des oscillations du jet de rive n'excède pas quelques minutes, alors que le niveau moyen de la mer varie sur des temps bien plus longs, environ 12 h en oscillations tidales lunaires.

Toutes les faces latérales du domaine de calcul (la colonne) sont prises à flux nul, ce qui conduit à confiner les écoulements verticalement et à ne pas examiner les transferts latéraux.

Pour les applications numériques, on choisit les paramètres suivants (cas d'un sable fin) :

- conductivité hydraulique à saturation: $K_{SAT} = 0.00015$ m/s.
- teneur en eau à saturation: $\square_{SAT} = 0.38$ m³/m³.

La période T choisie pour les oscillations du jet de rive (submersion périodique) est $T = 20$ s. Le maillage vertical est $\Delta z = 0.01$ m (soit un centimètre). Les mailles latérales peuvent être choisies arbitrairement (ici on a pris $\Delta x = \Delta y = 0.10$ m). Rappelons que la hauteur de la colonne (L) est choisie courte (20 cm) ou longue (100 cm). Cette hauteur représente aussi la profondeur L_z de la nappe de plage. Dans le premier test, $L_z = 20$ cm correspond à une nappe de plage qui serait « peu profonde » en zone de swash, tandis que dans le second test, $L_z = 100$ cm correspondrait au cas d'une nappe qui serait « profonde » en zone de swash.

II.2. Résultats préliminaires : présentation et analyses

Les résultats obtenus à ce jour pour les simulations de submersion périodique à la surface d'une plage de sable sont préliminaires. Une analyse plus approfondie est en cours, notamment à partir d'outils d'analyse des signaux mis au point à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. Néanmoins, ces premiers résultats appellent quelques commentaires, que l'on présente ci-dessous.

II.2.1. Evolution des flux d'eau à la surface du sol et au niveau de la nappe

En examinant l'évolution des flux frontières ($z = 0$ et $z = L$) (Figure 3-a, Figure 3-b) pour la nappe « peu profonde » située en $z = L = 20$ cm, on voit que la nappe commence rapidement à recevoir du flux provenant de la surface (dès la seconde période). Les flux négatifs/positifs alternent entre le haut et le bas, et l'amplitude des oscillations du flux est plus grande en surface ($z = 0$) qu'en bas de la colonne (au niveau $z = L$ où la nappe est fixée). Ces comportements sont ceux attendus.

Pour la nappe « profonde » ($L = 100$ cm) on constate que la face inférieure A3 de la colonne poreuse ne reçoit aucun flux durant la simulation (ceci sur plusieurs périodes). Les flux sortant du domaine par le bas sont nuls, ou négligeables en comparaison avec les flux entrants par le haut. On constate aussi que le régime périodique (ergodique)

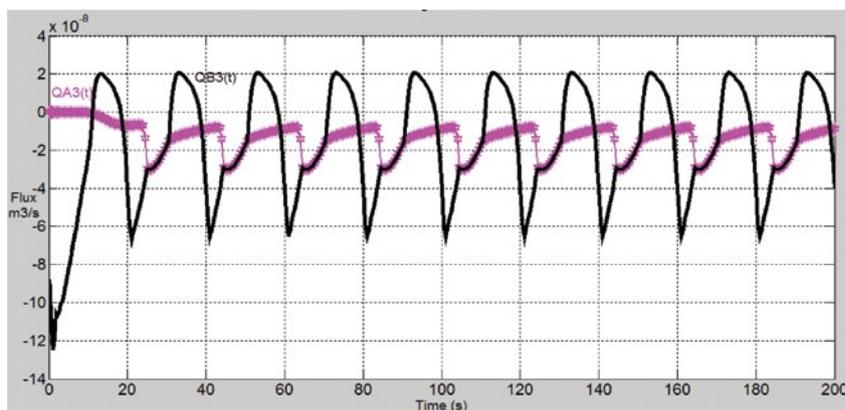


Figure 3-a : Evolution des flux à travers les faces inférieure et supérieure pour la nappe peu profonde. Flux $QA3(t)$ à travers la face inférieure $A3$ ($z = L$) en mauve, et flux $QB3(t)$ à travers la face supérieure $B3$ ($z = 0$) en noir. Ces résultats sont obtenus pour une condition de submersion périodique en surface, d'amplitude $A = 20$ cm et de période $T = 20$ s pour la nappe « peu profonde » ($L = 20$ cm).

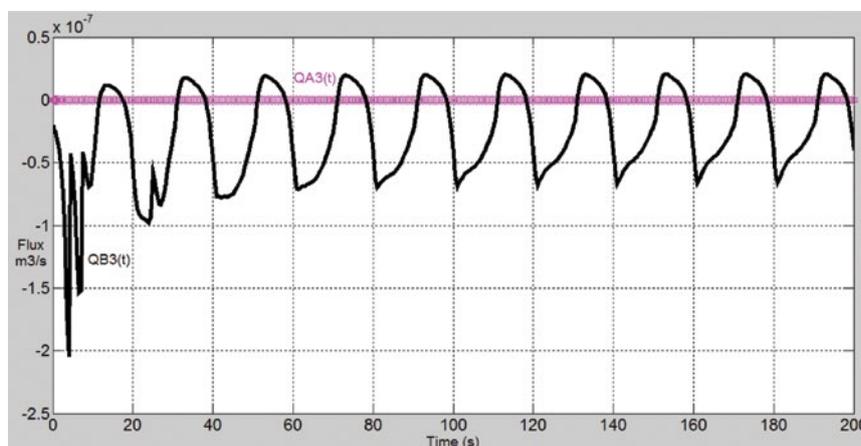


Figure 3-b : Evolution des flux à travers les faces inférieure et supérieure pour la nappe profonde. Flux $QA3(t)$ à travers la face inférieure $A3$ ($z = L$) en mauve, et flux $QB3(t)$ à travers la face supérieure $B3$ ($z = 0$) en noir. Condition de submersion périodique en surface, d'amplitude $A = 20$ cm et de période $T = 20$ s pour la nappe « profonde » ($L = 100$ cm). Noter que le flux inférieur est nul ($QA3(t) \approx 0$).

s'établit après 3 à 4 périodes (60 s à 80 s). En régime périodique, le mécanisme dominant est le stockage/déstockage d'eau en haut de la colonne. Le déstockage d'eau est causé par la désaturation de la surface lors des demi-périodes de retrait (apparition de pression $h < 0$, c'est-à-dire, mise en succion de la surface).

II.2.2. Evolution des profils de teneur en eau $\theta(z,t)$ dans la colonne de sable

Pour la nappe *peu profonde* ($L=20$ cm) (Figure 4-a, Figure4-b), les profils de teneur en eau $\theta(z,t)$ permettent de constater que la saturation du milieu à partir de la surface est rapide. La zone saturée (haut de la colonne) atteint plus de 6 cm à la première période, et dès la seconde période il apparaît une saturation (transitoire, périodique) du milieu tout entier. Il y a établissement d'un régime transitoire périodique de teneurs en eau, reproductible de période en période à partir de la 2^{ème} période. Les 15cm inférieurs de la colonne restent tout le temps proches d'un état de saturation totale,

car ils sont alimentés par la nappe du niveau moyen de la mer via les effets capillaires qui agissent ici de façon quasi-permanente. *Rappel des données de simulation :* profondeur de la nappe $z = L = 20$ cm ; amplitude et période du forçage de pression à la surface du sol : $A = 20$ cm et $T = 20$ s ; quelques propriétés du sable : $K_{SAT} = 0.00015$ m/s et $\theta_{SAT} = 0.38$ m³/m³.

Pour la nappe *profonde* ($L=100$ cm), les profils $\theta(z,t)$ de la Figure 5 montrent que l'évolution de la teneur en eau est plus lente : la zone atteinte par la saturation totale augmente lentement d'une période à l'autre (progression de 1 cm ou 2 cm par période). Par ailleurs, le bas de la colonne est très humide (teneurs en eau allant de 0.38 à 0.30 sur les 15cm du bas la colonne), mais cet état de saturation au bas de la colonne reste stable et n'est pas dû à la submersion périodique en surface. Il s'agit plutôt d'un effet de remontée capillaire depuis le niveau moyen de la mer ($z = 0$). *Rappels :* la nappe est ici à $L_z = 100$ cm de profondeur (nappe profonde) ; les autres paramètres restent inchangés par rapport au cas de la nappe peu profonde.

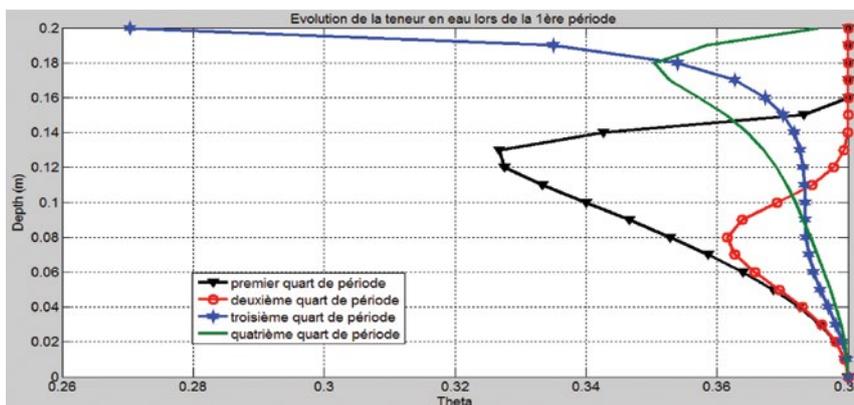


Figure 4-a : Profils $\theta(z,t)$ durant la 1^{ère} période (cas de la nappe peu profonde). Evolution du profil de teneur en eau $\theta(z,t)$ à 4 temps $t_n = nT/4$ durant la 1^{ère} période $t = [0s, 20s]$ entre les profondeurs $z = 0$ (surface du sable en haut) et $z = 20$ cm (surface de la nappe en bas).

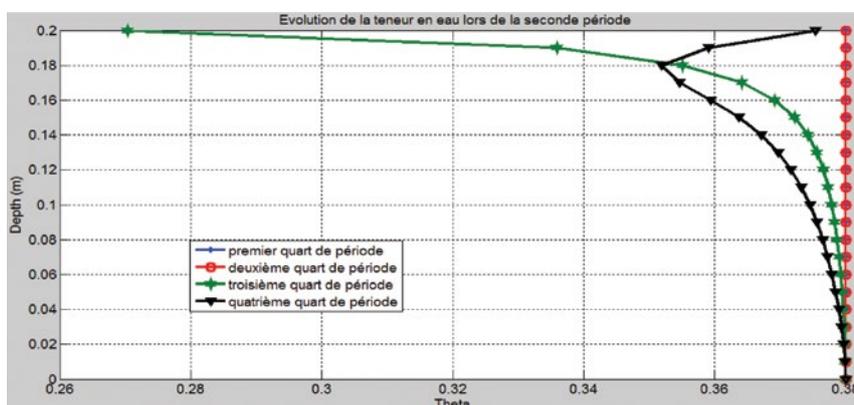


Figure 4-b : Profils $\theta(z,t)$ durant la 2^{ème} période (cas de la nappe peu profonde). Evolution du profil de teneur en eau $\theta(z,t)$ à 4 temps $t_n = nT/4$ durant la 2^{ème} période $t = [20s, 40s]$ entre les profondeurs $z = 0$ (surface du sable en haut) et $z = 20$ cm (surface de la nappe en bas).

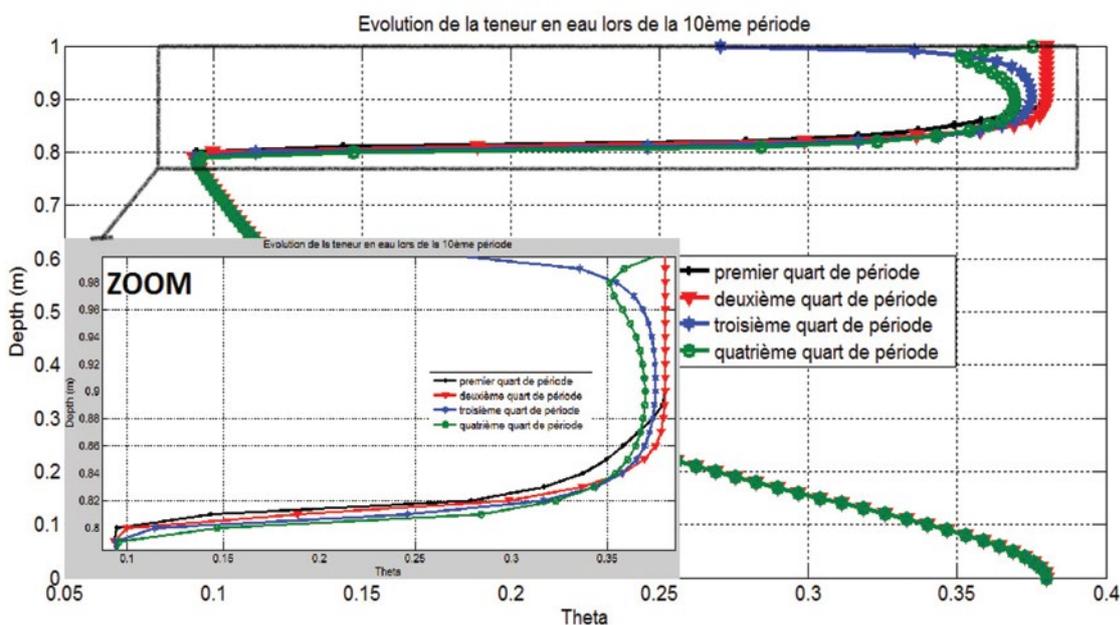


Figure 5 : Profils de teneur en eau durant la 10^{ème} période dans le cas de la nappe profonde. Evolution du profil de teneur en eau $\theta(z,t)$ à 4 temps $t_n = nT/4$ durant la 10^{ème} période $t = [180s, 200s]$, entre les profondeurs $z = 0$ en haut et $z = 100$ cm en bas. En inséré: zoom sur la zone superficielle de 20 cm.

III. DISCUSSION DES RÉSULTATS ET COMPARAISONS (NAPPE “PROFONDE”/ NAPPE “PEU PROFONDE”)

Pour mieux comprendre la différence entre les distributions verticales de teneur en eau dans les deux configurations (nappe « profonde » à 100 cm vs. nappe « peu profonde » à 20 cm), nous allons comparer les profils (z,t) dans les deux colonnes ($L = 100$ cm et $L = 20$ cm) au même instant « t », en examinant des *zoom* sur des zones particulières. Le choix de l’instant « t » est important. Ici, on va choisir $t = 5s = T/4$ (un quart de période) pour mieux voir la réponse des deux configurations. On verra que la nappe peu profonde ($L = 20$ cm) tend rapidement vers un état de saturation...

On définit les zones suivantes :

- **Zone 1 (Figures 6 et 7).** Cette zone représente les dix centimètres du haut de la colonne de sable de hauteur 1 m. La distribution verticale de teneur en eau est montrée au temps $t = T/4 = 5$ s.
- **Zone 2 (Figure 8a).** Cette zone représente les dix centimètres superficiels de la colonne de sable dans le cas d’une

nappe peu profonde ($L = 20$ cm). Le profil de teneur en eau est montrée au temps $t = T/4 = 5$ s.

- **Zone 3 (Figure 8b).** Cette zone représente à la fois les 20 cm du bas de la colonne de sable de hauteur 1 m (« nappe profonde »), et la colonne de sable de hauteur 20 cm tout entière (« nappe peu profonde »). On voit donc les 2 cas sur une même figure (nappe profonde et peu profonde). Les profils verticaux de teneur en eau sur cette zone sont représentés pour les deux cas au même temps $t = T/4 = 5$ s.

On constate que la pénétration de l’eau dans la colonne courte de 20 cm de hauteur (nappe peu profonde) est beaucoup plus rapide que dans la colonne longue de 1 m de hauteur (nappe profonde). En un quart de période ($t = T/4 = 5$ s), la pénétration du front de saturation vers le bas est de 4 cm pour la nappe peu profonde, contre 1 cm seulement pour la nappe profonde.

La distribution de la teneur en eau juste au-dessus de la nappe (vers le bas de la colonne) n’est pas affectée par le forçage périodique : on constate la même distribution sur les dix premiers centimètres juste au-dessus de la nappe (qu’elle soit profonde ou peu profonde).

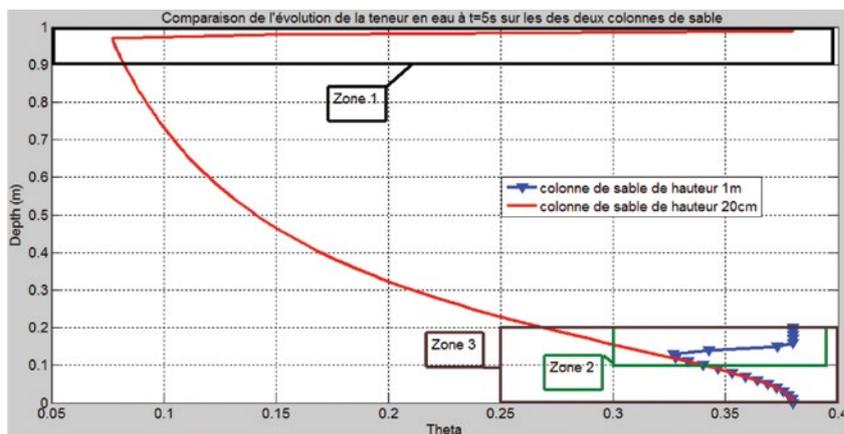


Figure 6 : Comparaison des profils de teneur en eau $\theta(z)$ en nappe profonde / peu profonde. Profils de teneur en eau $\theta(z)$ au temps $t = T/4 = 5$ s dans les 2 « colonnes » de hauteurs respectives 20 cm et 100 cm, correspondant aux cas de la nappe « peu profonde » (20 cm) et de la nappe « profonde » (100 cm).

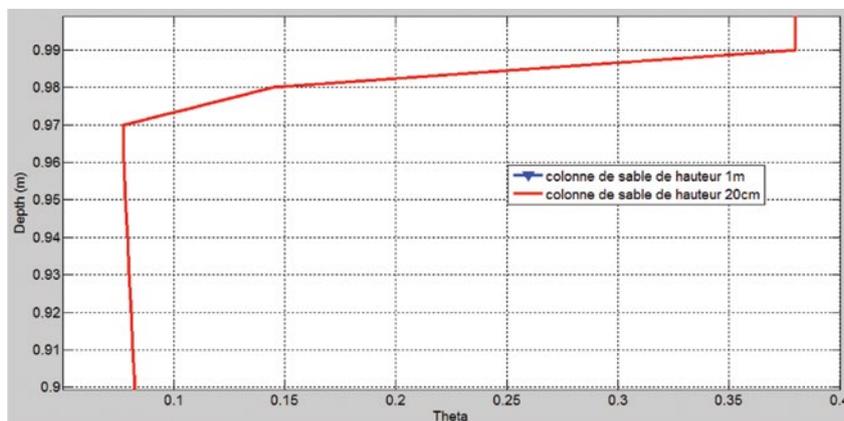


Figure 7 : Profil vertical de teneur en eau $\theta(z)$ dans la zone 1, au temps $t = T/4 = 5$ s. Profil de teneur en eau dans la zone 1 : il s’agit d’un zoom sur les 10 centimètres superficiels pour la colonne de sable de hauteur 1 m (cas de la nappe « profonde ») située à 1 m de profondeur).

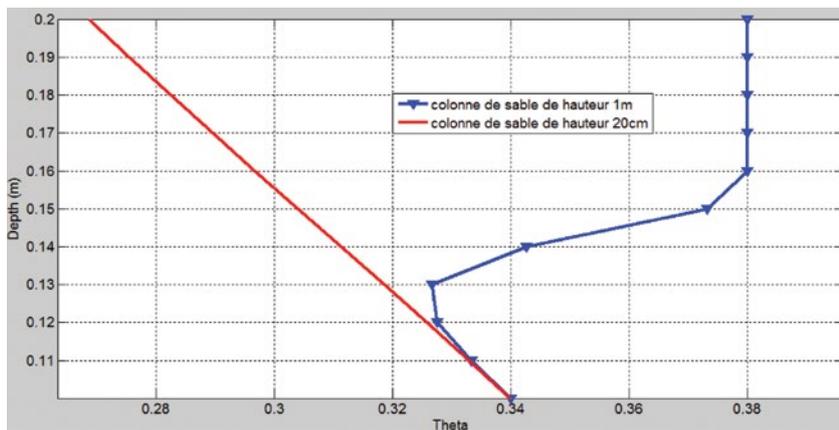


Figure 8-a : Profils de teneur en eau $\theta(z)$ dans la zone 2. Profil vertical de teneur en eau au temps $t = T/4 = 5\text{ s}$ dans la zone 2. Cette zone correspond aux dix centimètres du haut de la colonne de sable courte (nappe peu profonde, $L = 20\text{ cm}$). Note : l'ordonnée représente l'altitude, et l'abscisse représente la teneur en eau.

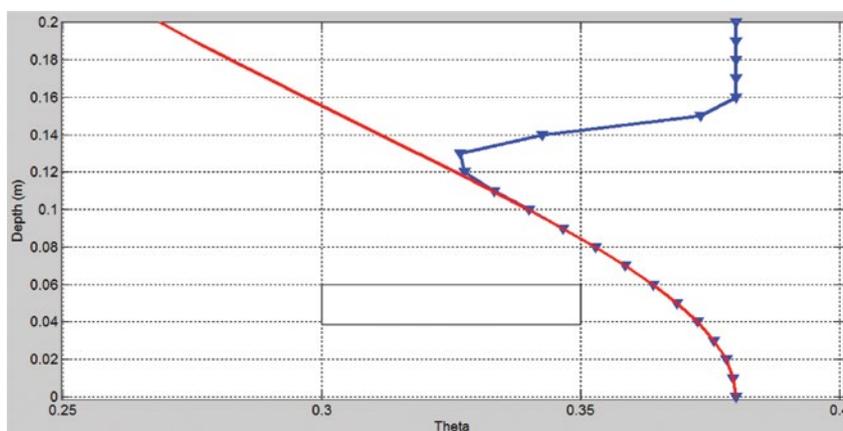


Figure 8-b : Profils de teneur en eau $\theta(z)$ dans la zone 3. Profils verticaux de teneur en eau au temps $t = T/4 = 5\text{ s}$ dans la zone 3, représentant (à la fois) les 20 cm du bas de la colonne profonde ($L = 100\text{ cm}$), et la totalité de la colonne courte ($L = 20\text{ cm}$). Note : l'ordonnée représente l'altitude ($z = 0$ au niveau de la nappe), et l'abscisse est la teneur en eau.

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La combinaison des effets gravitationnels et capillaires dans la colonne courte (colonne de 20cm de hauteur) accélère la saturation du milieu, et donne lieu à une humectation très rapide. Cette saturation rapide de la colonne soumise au forçage périodique submersif est directement liée à la présence d'une nappe peu profonde (cas de la colonne « courte »). Plus précisément, ceci est dû probablement au fait que la hauteur de la colonne dite « courte » est proche de la longueur capillaire caractéristique du sable fin utilisé. Comme extension immédiate de ce travail, on envisage de modifier la condition oscillatoire de submersion à la surface de la plage afin de la rendre plus réaliste (*cycles submersion/drainage* plutôt que *submersion/suction*), et d'introduire à terme des signaux de forçage non harmoniques. Dans ce dernier cas, on envisage des techniques de traitement du signal utilisant des fonctions de corrélation temporelles croisées, et des spectres de Fourier croisés, qui ont été mises au point lors d'études expérimentales par Ababou *et al.* 2012. Ici, ces techniques permettront d'analyser plus finement les effets

simulés du forçage de la zone de swash sur les écoulements et la teneur en eau à différentes profondeurs.

V. RÉFÉRENCES

ABABOU R., H. FATMI J.-M. MATRAY, CH. NUSSBAUM D. BAILLY (2012) — Statistical Analyses of Pore Pressure Signals in Claystone During Excavation Works at the Mont Terri Underground Research Laboratory. Chap. 17. *Radioactive Waste InTech - Open Access Publisher* (<http://www.intechweb.org>), ISBN: 979-953-307-274-5. Available on line. 373-430

ALASTAL K., R. ABABOU D. ASTRUC (2010) — Partially saturated oscillatory flow in a sandy beach (numerical modeling). *Proceedings XVIII Internat. Conf. on Computational Methods in Water Resources, CMWR 2010*. J. Carrera (ed). CIMNE - International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, Spain, 2010. 8pp

ALASTAL K., R. ABABOU D. ASTRUC (2011) — Partially saturated oscillatory flow under tidal conditions in homogeneous and layered soil columns (experiment and simulations). *Proc.*

- 2nd CM2 Conf. (2nd Coastal and Maritime Mediterranean Conf., Tangiers, Morocco, 22-24 Nov.2011). 113-118
- ALASTAL K. (2012) — Oscillatory flows and capillary effects in partially saturated and unsaturated porous media: applications to beach hydrodynamics. (Ecoulements oscillatoires et effets capillaires en milieux poreux partiellement saturés et non saturés : applications en hydrodynamique côtière). *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (IMFT), France*. 226 p
- CHEN H., G. F. PINDER (2011) — Investigation of Groundwater Contaminant Discharge into Tidally influenced Surface-water Bodies: Theoretical Analysis. *Transp. Porous Med.* **89(3)** : 289-306
- JENG D. S., B. R. SEYMOUR, D. A. BARRY, J.-Y. PARLANGE, D. A. LOCKINGTON, L. LI (2005) — Steepness expansion for free surface flows in coastal aquifers. *J. Hydrol.* **309(1)** : 85-92
- NIELSEN P. (1990) — Tidal dynamics of the water table in beaches. *Water Resour. Res.* **26(9)** : 2127-2134