



HYDRO-FOND HYDROMÉCANIQUE DES GÉOMATÉRIAUX DE FONDATION IMMERGÉS

PROGRAMME C2D2

RAPPORT FINAL

Mai 2014



Date de début des études	01/04/2011
Durée	3 ans
Coût	463.9€ TTC
Financeurs et montants	MEDDTL - DGITM : 249.9 k€
Equipe	Lab. 3SR – UMR 5521, Grenoble INP Lab. LEGI – UMR 5519, Grenoble INP LaMI - EA 3867 Sogreah
Chef de projet	Chareyre Bruno, lab. 3SR, Grenoble INP, Grenoble
Mots clés	micromécanique, couplages, solide-fluide, houle, érosion, liquéfaction, écoulement, auscultation, modélisation.

RESUME

La déstabilisation des sols de fondation immergés par les sollicitations dynamiques liées à la houle ou aux courants est un facteur déterminant dans la stabilité et l'évolution des aménagements côtiers et fluviaux, ouvrages hydroélectriques et structures off-shore. Les phénomènes en jeu résultent du couplage entre la dynamique de l'écoulement externe et le comportement mécanique du matériau sédimentaire, sujet à des phénomènes de liquéfaction qui peuvent faciliter son érosion et/ou déstabiliser les structures. Le projet Hydrofond proposait une approche multidisciplinaire des problèmes d'interaction dynamique sol-fluide-structure, afin d'améliorer la connaissance et la maîtrise des phénomènes en jeu, dont tout particulièrement la liquéfaction momentanée.

L'interaction vagues-sédiment en pied d'obstacle a été étudiée sur modèle physique en canal afin d'analyser (1) le déferlement en pied d'obstacle, et (2) la réponse du sédiment à une houle stationnaire non-déferlante. Ces campagnes ont impliqué le développement de méthodes de mesure de champs permettant de représenter les champs de déplacement des particules du sédiment. En complément la pression du fluide est mesurée en différents points. Pour chaque type de vague, les essais ont été reproduits avec différents états de compacité et différents degrés de saturation, afin de mettre en évidence le rôle des propriétés mécaniques du sédiment. La caractérisation du sédiment a reposé sur des mesures in-situ (i.e. en canal) et des essais de laboratoire conventionnels.

Un modèle numérique dédié à ce type de phénomène a été développé. Il repose sur la résolution simultanée de deux problèmes: écoulement turbulent dans la phase fluide libre, et problème de couplage poro-mécanique dans le sédiment. Sa mise en œuvre implique le code de calcul Open-FOAM pour la partie turbulente et un couplage dit « DEM-PFV » pour la partie sédimentaire dense simulée comme un matériau granulaire. Les simulations DEM-PFV seules mettent bien en évidence les processus de liquéfaction liés soit au caractère contractant du matériau soit à des déphasages d'ondes de pression liés à la compressibilité du fluide. Elles restent cependant limitées à des cas académiques en l'absence d'informations précises sur le champ fluide à l'interface écoulement-sédiment dense. Le système couplé CFD-PFV comble ce manque. Il a été validé par des données issues du volet expérimental. Associées aux essais de laboratoires, les simulations multi-échelles ont permis une analyse fine des phénomènes pouvant conduire à la ruine des fondations immergées.

Les résultats conduisent les partenaires à envisager à la suite d'Hydrofond l'extension de la méthodologie numérique vers les couplages forts. Si Hydrofond s'est concentré sur les sollicitations hydrodynamiques du domaine côtier, la démarche pourrait aussi être transposée à des ouvrages en rivière tels que ponts, digues et barrages. Ce large champ d'applications justifie à nos yeux de poursuivre nos développements et d'en disséminer l'usage. Nous pensons qu'ils contribueront à la prochaine génération d'outils numériques pour l'ingénierie.

Sommaire

<i>1. Introduction</i>	<i>p.4</i>
<i>2. Partenaires</i>	<i>p.5</i>
<i>3. Objectifs</i>	<i>p.6</i>
<i>4. Travaux réalisés</i>	<i>p.7</i>
<i>5. Livrables</i>	<i>p.34</i>
<i>6. Publications</i>	<i>p.36</i>
<i>7. Dépenses</i>	<i>p.38</i>
<i>8. observations des relecteurs</i>	<i>p.39</i>

Annexes

- A. Annexe financière
- B. Livrable 3
- C. Livrable 5
- D. Livrable 6
- E. Livrable 7
- F. Livrable 12
- G. Livrable 13

1. INTRODUCTION

La déstabilisation des sols de fondation immergés par les sollicitations dynamiques liées à la houle ou aux courants est un facteur déterminant dans la stabilité et l'évolution des aménagements côtiers et fluviaux, ouvrages hydroélectriques et structures off-shore. Les phénomènes en jeu résultent du couplage entre la dynamique de l'écoulement externe et le comportement mécanique du matériau sédimentaire, sujet à des phénomènes de liquéfaction qui peuvent faciliter son érosion et/ou déstabiliser les structures. Ces phénomènes trouvent leur origine dans des couplages mécaniques solide-liquide-gaz qui, bien que relativement simple à l'échelle des particules, produisent en conditions réelles des comportements complexes encore difficilement accessibles par la modélisation. Ils constituent des défis majeurs pour les sciences de l'ingénieur, et requiert des avancées importantes, tant sur le plan des connaissances phénoménologiques que sur le plan de la modélisation et des changements d'échelle, à l'interface entre la dynamique des fluides et la mécanique des matériaux granulaires.

Le projet Hydrofond proposait une approche multidisciplinaire des problèmes d'interaction dynamique sol-fluide-structure, afin d'améliorer la connaissance et la maîtrise des phénomènes en jeu, dont tout particulièrement la liquéfaction momentanée. Il reposait sur un programme expérimental ambitieux et incluait le développement d'un modèle numérique couplé solide-fluide par éléments discrets (méthode DEM-PFV) pouvant s'appliquer aux sédiments sous sollicitations hydrodynamiques. A l'issue du projet un système de modélisation multi-échelles est produit, associant la DEM-PFV à des calculs de dynamique des fluides (CFD).

Les travaux ont été organisé autour de deux volets. Le premier volet concerne les aspects expérimentaux (resp. H. Michallet, LEGI), tandis que le second concerne les travaux de modélisation numérique (resp. Bruno Chareyre, 3SR). Ce rapport donne une vision synthétiques de ces eux volets. Des rapports plus détaillés sur chacun des points lui sont annexés.

2. PARTENAIRES

Groupement	
	Chef de projet
Nom, prénom	Chareyre Bruno
Organisme	lab. 3SR / G-INP
Adresse	BP 53 - 38041, Grenoble cedex 9
Tel, Fax	04 56 52 86 21, 04 76 82 70 43
Courriel	bruno.chareyre@hmg.inpg.fr
	Partenaire 1
Nom, prénom	Chareyre Bruno
Organisme	lab. 3SR / G-INP
Adresse	BP 53 - 38041, Grenoble cedex 9
Tel	04 56 52 86 21, 04 76 82 70 43
Courriel	bruno.chareyre@hmg.inpg.fr
	Partenaire 2
Nom, prénom	Barthélémy Eric
Organisme	LEGI / G-INP (coll. Pierre Breul - LaMI/Univ. Clermont II)
Adresse	BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9
Tel	04 76 82 50 28
Courriel	eric.barthelemy@hmg.inpg.fr
	Partenaire 3
Nom, prénom	Breul Pierre
Organisme	LAMI/Univ. Clermont II (coll. Younès Haddani / entreprise SOL SOLUTION)
Adresse	Les Cézeaux, BP 265, 63175 Aubière cedex
Tel	04 73 40 75 23
Courriel	pierre.breul@polytech.univ-bpclermont.fr
	Partenaire 4
Nom, prénom	Eric David
Organisme	SOGREAH
Adresse	6 rue de Lorraines 38130 Echirolles
Tel	04 76 33 42 36
Courriel	Eric.david@sogreah.fr

3. RAPPEL DES OBJECTIFS

Volet et objectif visé par le projet

Volet « Comportement des bâtiments, des ouvrages et des infrastructures face au changement climatique »
 Objectif « Comportement des matériaux de construction existants sous l'effet du changement climatique »

Problématique

L'étude et la modélisation des phénomènes dynamiques impliquant des interactions entre phases solides, liquides et gazeuses constituent des défis majeurs pour l'ingénierie, liés notamment à la conception des structures côtières et maritimes, et à l'impact des scénarios de changement climatique sur leur évolution. Ces défis nécessitent des avancées importantes, tant sur le plan des connaissances phénoménologiques que sur le plan de la modélisation.

Objectifs

Le projet s'intéresse aux phénomènes de liquéfaction et d'érosion de sédiments sous chargements hydrodynamiques, pouvant conduire à la ruine d'aménagements. Centré sur les structures côtières et maritimes, le projet comporte un volet scientifique ambitieux, incluant le développement de modèles micro-mécaniques de couplage basés sur la physique locale (méthode des éléments discrets). Il vise le développement des connaissances phénoménologiques autant que le développement d'outils numériques de modélisation prédictive.

Méthodologie

Le projet propose des approches expérimentales, en canal à houle et sur modèle réduit d'ouvrage marin, des interactions hydrodynamiques eau-sédiment. Les techniques mises en oeuvre incluent notamment des mesures par PIV, des capteurs par fibres optiques, et des mesures par pénétromètre PANDA III. On associe à ce volet expérimental le développement d'un modèle numérique par éléments discrets couplé avec un modèle d'écoulement interne, implémenté dans la plate-forme YADE. Les simulations numériques permettront d'étudier le lien entre le comportement dynamique du sédiment à l'échelle des particules et ses manifestations à l'échelle du volume élémentaire représentatif. Une meilleure compréhension de ce problème de changement d'échelle est attendue, et permettra notamment un calage des méthodes d'analyse inverse. *Les avancées réalisées seront intégrées dans le contexte opérationnel par implantation dans le logiciel TELEMAC (note: voir amendement section 4.2.2).*

Résultats attendus

Le volet expérimental ambitieux permettra de mieux connaître l'importance des différents phénomènes en jeu : fréquence et amplitude des sollicitations, état et évolution du sédiment, influence de la teneur en air résiduelle... Les modèles physiques permettront de faire progresser l'expertise des partenaires dans les domaines applicatifs visés, tout en fournissant des résultats essentiels pour la calibration de méthodes expérimentales (endoscopie, pénétromètre Panda) et numériques. Les résultats ont vocation à être intégrés dans des outils opérationnels comme le logiciel TELEMAC. Le modèle numérique développé à l'issue du projet devra permettre à terme la réalisation d'expériences numériques à caractère prédictif pour une large classe de problèmes de couplage hydromécanique. Les développements seront regroupés et diffusés sous forme d'un module spécifique « couplages » de la plate-forme Yade Open-DEM (<https://yade.hmg.inpg.fr>). Enfin, la méthode numérique de couplage est susceptible de s'appliquer dans d'autres domaines du Génie Civil où les couplages solide-fluide et les phénomènes cycliques sont en jeu (gel-dégel et dessiccation-gonflement dans les remblais routiers et ferroviaires, digues, barrages en terre).

4. TRAVAUX RÉALISÉS

4.1 VOLET EXPÉRIMENTAL.

4.1.1 MODÈLE PHYSIQUE EN CANAL À HOULE (LEGI)

L'interaction vagues-sédiment en pied d'obstacle a été étudiée sur modèle physique en canal (figure 1). Une paroi verticale en haut de plage joue le rôle d'un ouvrage côtier. Deux campagnes de mesures ont été conduites par le LEGI pour analyser (1) le déferlement en pied d'obstacle, et (2) la réponse du sédiment à une houle stationnaire non-déferlante. Ces campagnes ont impliqué le développement de méthodes de mesure de champs permettant de représenter les champs de déplacement des particules du sédiment. En complément la pression du fluide est mesurée en différents points.

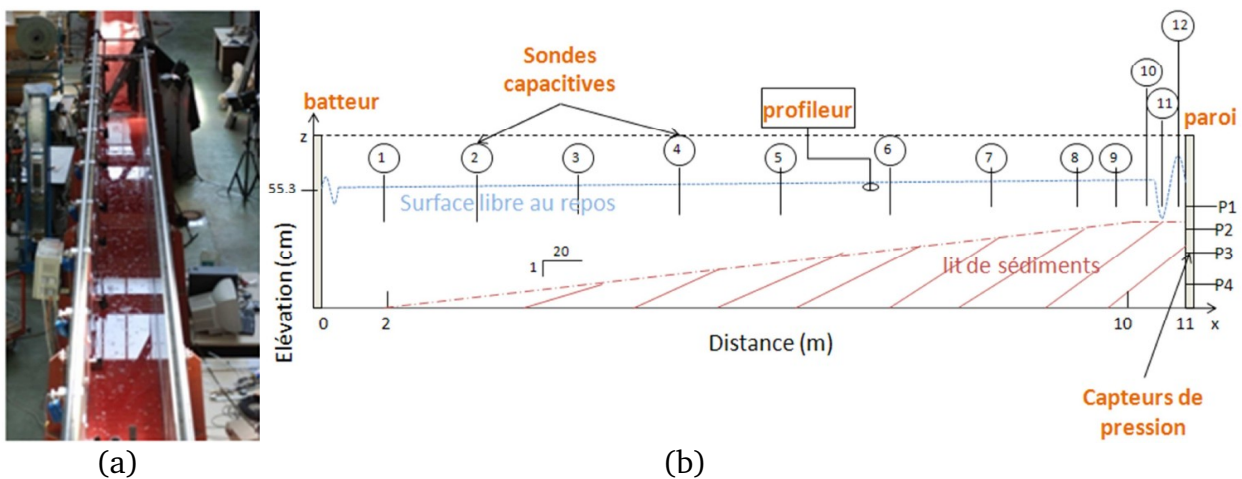


Figure 1. (a) Canal à houle du LEGI et (b) son instrumentation

Pour chaque type de vague, les essais ont été reproduits avec différents états de compacité et différents degrés de saturation, afin de mettre en évidence le rôle des propriétés mécaniques du sédiment. Ce rôle est manifeste dans les processus morpho-dynamiques (fig. 3) et dans le potentiel de liquéfaction momentanée.

Les études réalisées dans ce volet sont rapportées en détail dans les annexes **XXXX**. Elles ont produit une quantité conséquente de données, dont beaucoup sont originales.

Une contribution importante de ces essais est la mise en évidence de mécanismes de déformation en profondeur dans le lit sédimentaire (fig. 5). Contrairement à ce que suggérerait une vision centrée sur l'érosion de grains à la surface du sédiment, les essais ont ainsi montré que les fluctuations de pression associées aux vagues peuvent produire des déformations au cœur du sédiment, à des profondeurs bien supérieures aux seules couches superficielles (fig. 2). Ce

phénomène s'explique par la *liquéfaction momentanée* du sédiment, attestée par les mesures de pression.

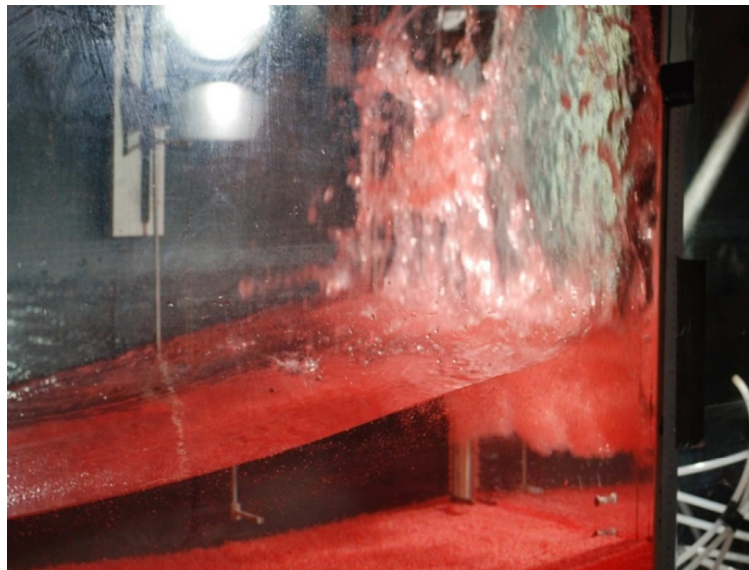


Figure 2. Déferlement de vague sur la paroi.

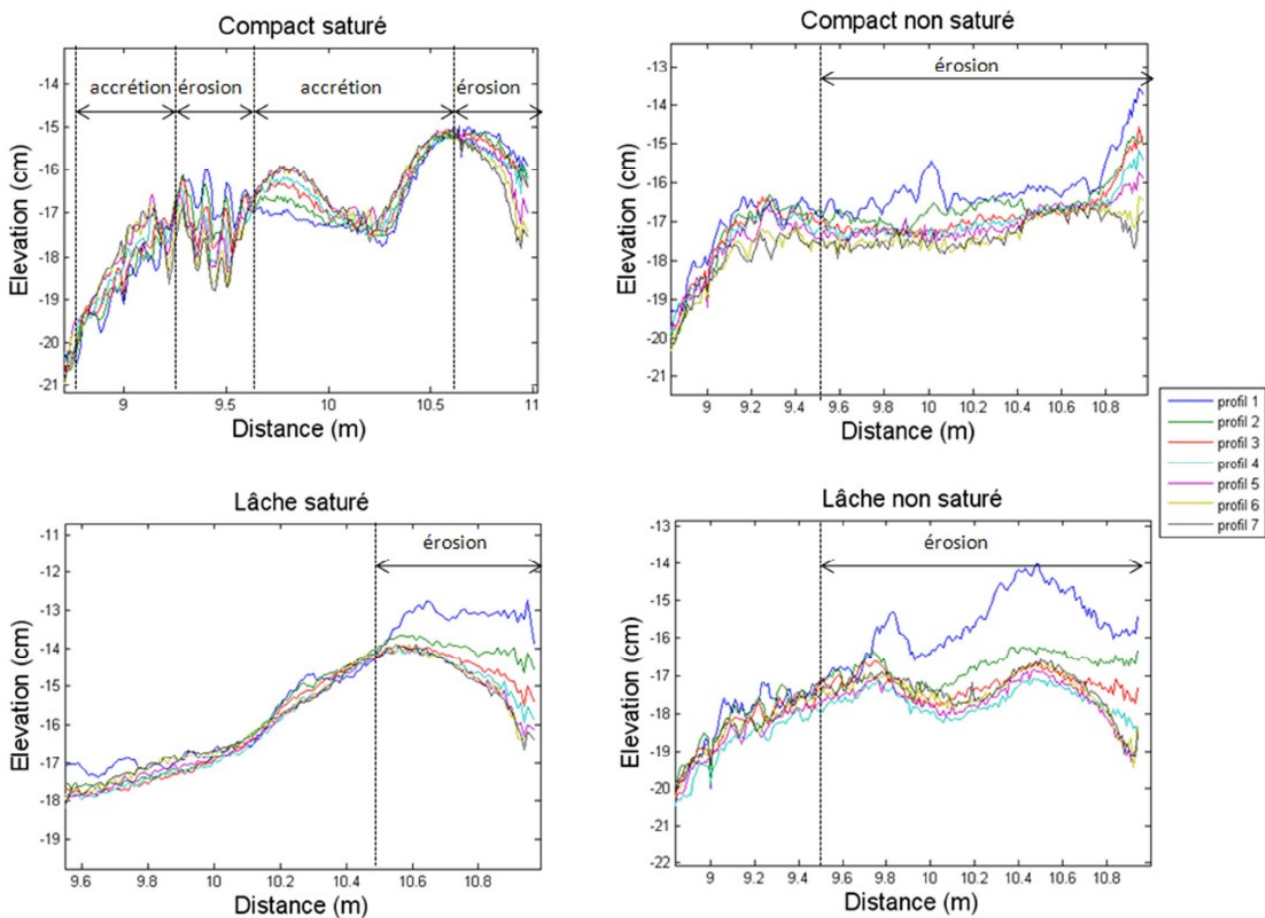


Figure 3. Evolution du profil de fond pour quatre états initiaux du sédiments.

La liquéfaction est un phénomène qui résulte du couplage entre la déformation d'un matériau granulaire et la pression du fluide interstitiel. Dans certaines circonstances, ce phénomène provoque un brusque changement des propriétés mécaniques du matériau, qui passe en quelques sortes de l'état solide à l'état liquide. Un phénomène de ce type est connu sous le nom de “sables mouvants”. Dans le cas des fondations immergées, ce phénomène peut être à l'origine de désordres graves en déstabilisant les ouvrages. Il amplifie également les phénomènes d'érosion en rendant le sédiment plus facilement mobilisable par vagues et courants marins.

En mettant en évidence des manifestations fréquentes de la liquéfaction et de ses conséquences dans des régimes hydrodynamiques variés, les campagnes d'essais ont justifié a posteriori le choix fait par Hydrofond de placer ce phénomène au centre des investigations.

Des études précédentes conduites au LEGI attestent déjà du rôle important des bulles d'air piégées dans le sédiment dans la liquéfaction. Dans les sédiments marins, ces bulles proviennent de l'activité bactérienne et de l'alternance du niveau de la mer avec les marées. Les campagnes expérimentales réalisées dans le cadre d'Hydrofond ont permis d'évaluer plus finement le rôle de cette teneur en air, ainsi que celui de l'état de compacité du matériau. Elles fournissent une base de données très riche, qui sert de référence pour les simulations numériques.

Etant donnée l'abondance des résultats, une partie seulement des mesures a pu être confrontée à la simulation numérique dans le cadre d'Hydrofond. L'exploitation de ces résultats se poursuit actuellement, en collaboration entre le LEGI et 3SR.

Partenaire impliqué: LEGI

Personnes impliquées:

Permanents: Hervé Michallet, Eric Barthélémy

Recruté sur contrat Hydrofond: Emanuele Catalano (Post-Doc)

Recruté sur fonds propres: Céline Berni (Thèse Grenoble INP, puis ATER Grenoble INP), Valérie Rameliarison (Master recherche), Tim Nagel (Master recherche)

Livrable #6: Modélisation Physique de l'Erosion au pied d'une structure côtière (Annexe C).

Référence #6.1: Valérie Rameliarison, 2012, rapport de Master 2 recherche.

Référence #6.2: Valérie Rameliarison et al., 2012, Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier.

Référence #6.3: Hervé Michalet et al., 2012, 6th International conference on Scour and Erosion.

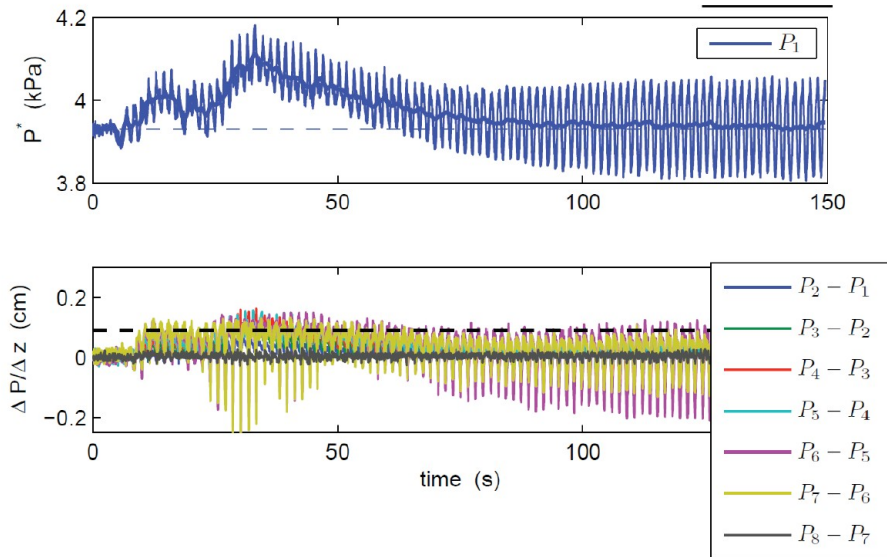


Figure 4. Evolution de la pression interstitielle en pied d'obstacle en régime de houle (expérience 37). La liquéfaction (seuil en pointillé dans le second graph) est observée dans une phase transitoire $10s < t < 50s$.

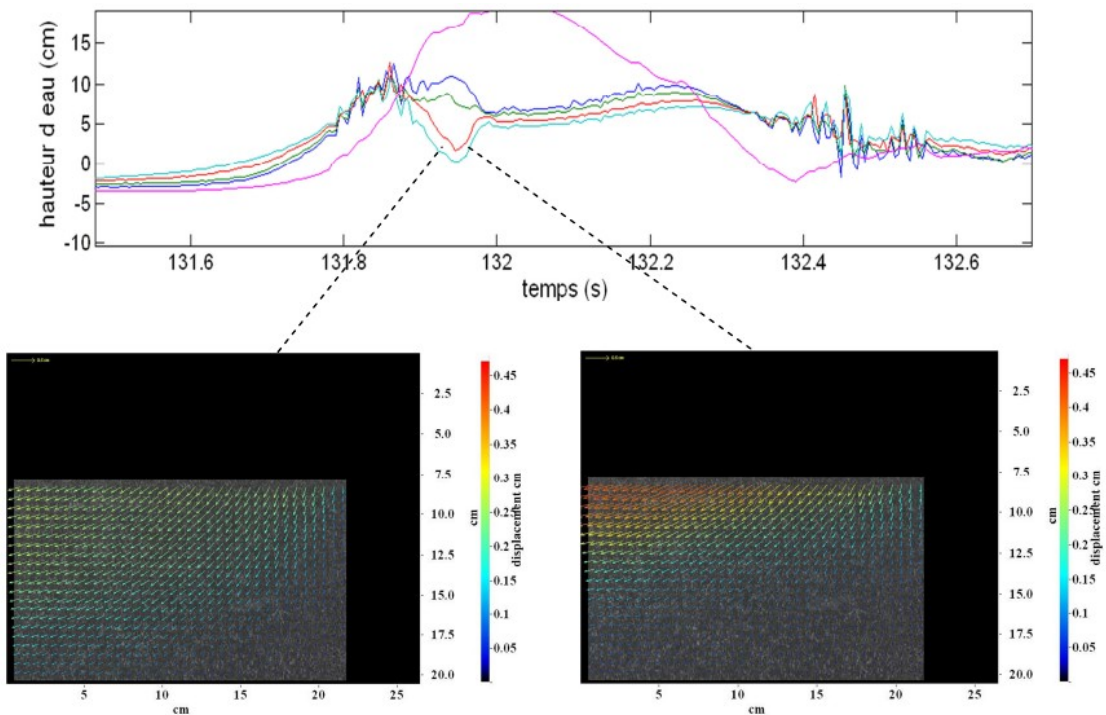


Figure 5. Mesures de déplacement dans le lit sédimentaire au passage d'une vague (essai LNS 3)

4.1.2 ESSAIS IN-SITU ET EN LABORATOIRE (LAMI / LEGI)

Afin de respecter des relations de similitude entre le domaine côtier et le modèle réduit en canal (permettant d'extrapoler à un sédiment sableux réel les résultats expérimentaux), le sédiment modèle est un matériau granulaire dont les grains sont constitués de matériau plastique (PMMA, fig. 6) de densité légèrement supérieure à celle de l'eau. Cette particularité, ainsi que le mode spécifique de mise en place du sédiment dans le canal, rendent nécessaires des essais de caractérisation visant à définir des propriétés mécaniques représentatives de l'état du matériau au moment où il subit l'action des vagues.

Cette caractérisation est nécessaire non seulement pour mettre en relation le comportement observé avec les mesures accessibles en situation réelle pour un sédiment côtier, mais aussi pour fournir des données d'entrée fiables pour la simulation numérique. A cette fin, le partenaire LAMI a effectué deux missions d'une semaine chacune pour étudier le sédiment en place dans le canal à l'aide de techniques avancées: pénétromètre statique pour déterminer la résistance mécanique, et géo-endoscope pour évaluer la teneur en air. Une certaine quantité (1m³) de matériau a également été transporté au laboratoire LAMI pour permettre une série d'essais de caractérisation conventionnels de mécanique des sols, et des essais en chambre de calibration.

L'étude a été réalisée en 3 étapes :

- - Développement des essais pour caractériser le matériau en place.
- - Essai de caractérisation du matériau en laboratoire
- - Etude du comportement à la liquéfaction dans le canal à houle du LEGI sous différents régimes de houle.



Fig. 6 : Sédiment granulaire synthétique de faible densité utilisé durant l'étude: avant d'être moulu et réduit à la taille utilisée dans les expériences (à gauche), à la taille réelle des expériences PMMA Rouge (au milieu) PMMA Blanc (à droite)

L'objectif du travail présenté ici est de caractériser le matériau granulaire synthétique et d'implémenter une méthodologie pour mesurer, en place, les caractéristiques de ce milieu. Il s'agit plus particulièrement de caractériser l'indice de vides et la teneur en air qui sont les paramètres les plus sensibles vis à vis du potentiel de liquéfaction. Pour cela, nous avons développé un essai pénétrométrique statique allégé et utilisé la géoendoscopie.

L'étude proprement dite comprend deux volets. En premier lieu, une caractérisation du matériau synthétique en laboratoire est réalisée en vue d'obtenir les caractéristiques physiques et les courbes de calibration du matériau permettant de relier sa résistance à un état de densité en place. En second lieu, des essais ont été réalisés au sein du canal pour différentes configurations

de houle afin d'étudier l'influence des caractéristiques de la houle, sur l'état du matériau et de mettre en évidence le rôle de la teneur en gaz et de la densité initiale du lit sur sa liquéfaction.



Fig.7: Exemple d'image géoendoscopique et mise en évidence de la présence de bulles d'air

Difficultés rencontrées :

3 difficultés techniques ont été rencontrées liées essentiellement aux caractéristiques du matériau granulaire étudié :

- Mesure automatique de la teneur en air : du fait des propriétés colorimétriques du matériau, il n'a pas été possible de développer un programme de traitement automatique des images permettant de mesurer la teneur en air de façon systématique et fiable. Finalement, cette estimation a été réalisée manuellement à partir des images enregistrées (fig. 7).
- Mesure de la résistance de pointe en place : Devant les très faibles résistances du matériau au sein du canal, l'utilisation du pénétromètre Panda initialement prévue n'a pas pu être mise en œuvre, le poids propre de l'appareillage étant trop lourd par rapport aux résistances à mesurer. Pour palier ce problème, un essai pénétrométrique statique allégé adapté à ce matériau et permettant de mesurer des résistances de l'ordre de 0,010MPa a été développé (cf. fig. 8). Cet outil a permis de réaliser les courbes de calibration du matériau granulaire permettant par la suite de relier sa résistance au sein du canal à un état de densité en place.
- Mesure de la perméabilité : les mesures de perméabilités du matériau effectuées par différents moyens ont montré une variabilité assez importante. Cette variabilité peut s'expliquer par la « mouillabilité » du matériau synthétique qui est très longue et qui a engendré des problèmes de mise en place et de réalisation d'essai en laboratoire. Pour tenter de palier ce problème les temps de mouillabilité du matériau ont été allongés avant de réaliser les essais proprement dits (tableau 1).

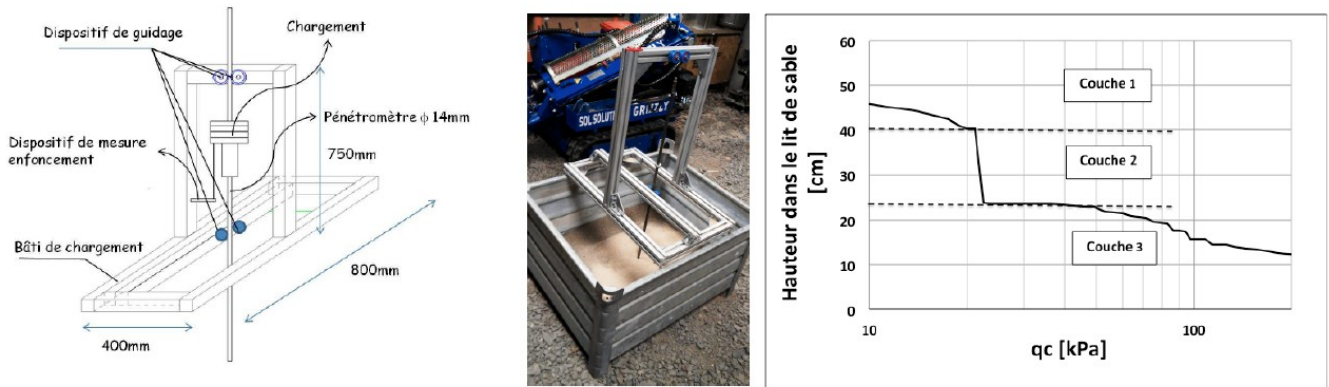


Fig. 8. (Gauche et centre) Schéma du bâti de chargement statique développé pour le canal à houle et photo du bâti de chargement statique pour le canal à houle - (droite) exemple de pénétrogramme obtenu

<i>Essai</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Etat de compacité	<i>Masse volumique sèche [g/cm³]</i>	<i>0,622</i>	<i>0,612</i>	<i>0,707</i>	<i>0,612</i>
	<i>DR [%]</i>	<i>54,70</i>	<i>43,00</i>	<i>135,68</i>	<i>43,00</i>
	<i>e</i>	<i>0,899</i>	<i>0,932</i>	<i>0,672</i>	<i>0,932</i>
<i>Perméabilité</i>	<i>K [cm/s]</i>	<i>1,3E-02</i>	<i>1,4E-02</i>	<i>1,1E-02</i>	<i>1,5E-02</i>

Tableau 1. Résultats des essais au perméamètre de Darcy

Principaux résultats obtenus

Courbes de calibration du sédiment synthétique : L'objectif des essais en moule de calibration est d'obtenir une courbe permettant d'estimer la compacité du matériau en place à partir d'une mesure de résistance de pointe obtenue à l'essai de pénétration (fig. 9). Les courbes de calibration obtenues ont des allures conformes à celles obtenues habituellement pour des matériaux granulaires naturels, que ce soit en termes de densité relative ou d'indice des vides.

Relations module--compacité: A partir des essais triaxiaux réalisés sur le sédiment synthétique, des relations liants les modules d'élasticité avec la compacité (DR) ont été développées (fig. 10) dans le but d'obtenir les modules des matériaux en place et d'appliquer le modèle de Sakai de liquéfaction.

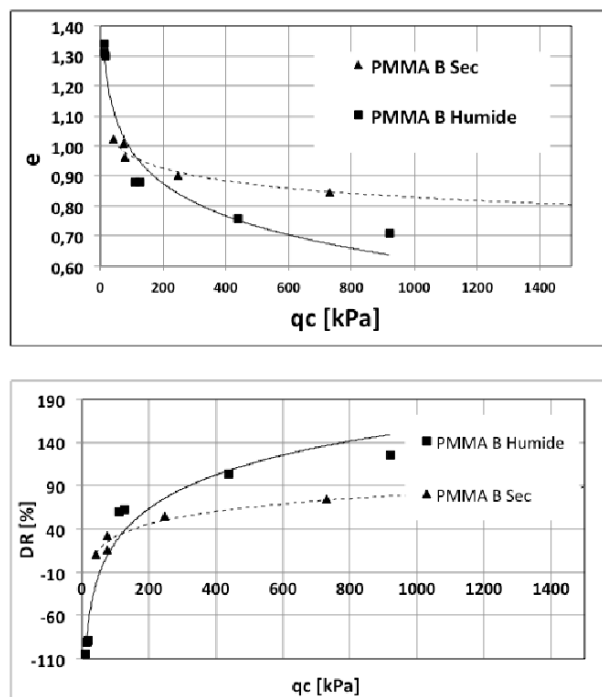


Figure 9. Courbes de calibration du sédiment synthétique pour différents états hydriques (sec et humide $w=17\%$)

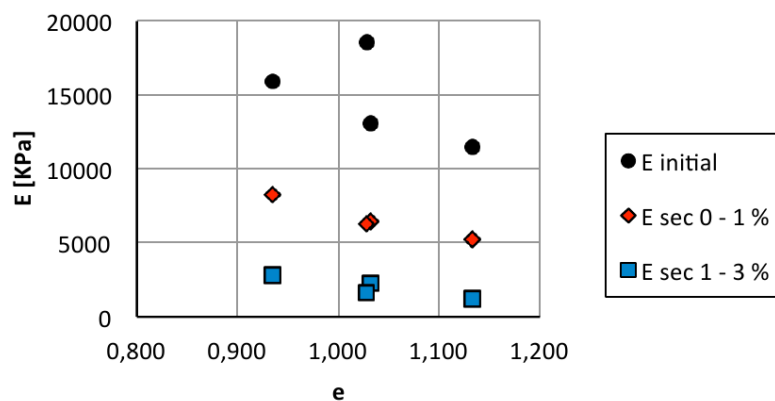


Figure 10: Variation des modules d'élasticité en fonction de l'indice des vides

Caractérisation de l'état du sédiment synthétique en place dans le canal :

A partir des 2 campagnes d'essais réalisées dans le canal à houle, différents types de sollicitations ont testées (fig. 11). Des sondages ont été réalisés sur trois configurations différentes du lit sédimentaire :

- LIT 1 : Etat lâche, légèrement humide,
- LIT 2 : Etat moyennement compact saturé,
- LIT 3 : désaturation et re-saturation.

Les essais de caractérisation du lit sédimentaire ont été effectués :

- à l'état initial après mise en oeuvre du lit,
- après une simulation cyclique de houle 1 (amplitude $A=5\text{mm}$ et période $T=1,55\text{ s}$),
- après une simulation cyclique de houle 2 ($A=10\text{mm}$ et $T= 1,55\text{ s}$),
- après une simulation cyclique de houle 3 ($A=20\text{mm}$ et $T= 1,55\text{ s}$),
- après une simulation cyclique de houle 4 ($A=30\text{mm}$ et $T= 1,55\text{ s}$),
- après une simulation cyclique de houle 5 ($A=5\text{mm}$ et $T= 1,55\text{ s}$),
- après impact de la vague

Evolution de la compacité du matériau :

L'analyse des résultats a permis de mettre en évidence l'évolution de la compacité du matériau au fur et à mesure des épisodes de houle (fig. 12). Entre 0 et 20 cm, le matériau a tendance à se compacter avec les sollicitations. Mais il semble qu'il se crée une zone intermédiaire (entre 20 et 35 cm) où les résistances sont plus faibles. L'existence de cette zone semble correspondre à la zone de cisaillement du lit lors du passage des vagues.

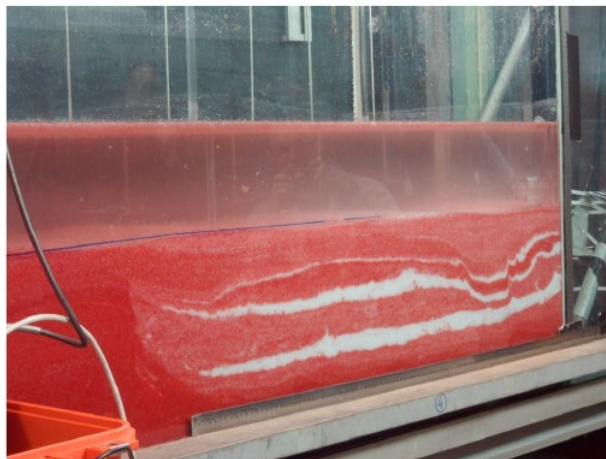
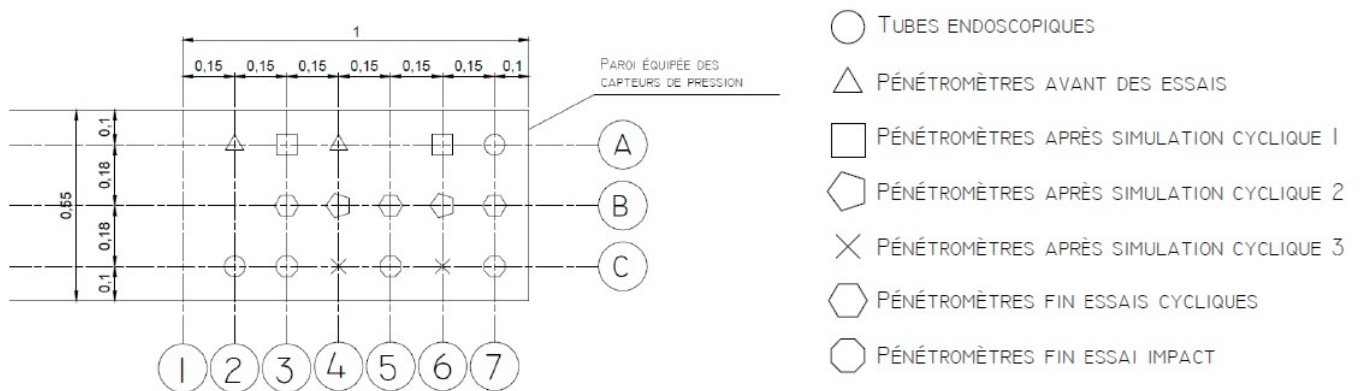


Figure 11. Position d'implantation des sondages pénétrométriques et endoscopiques dans le canal à houle.

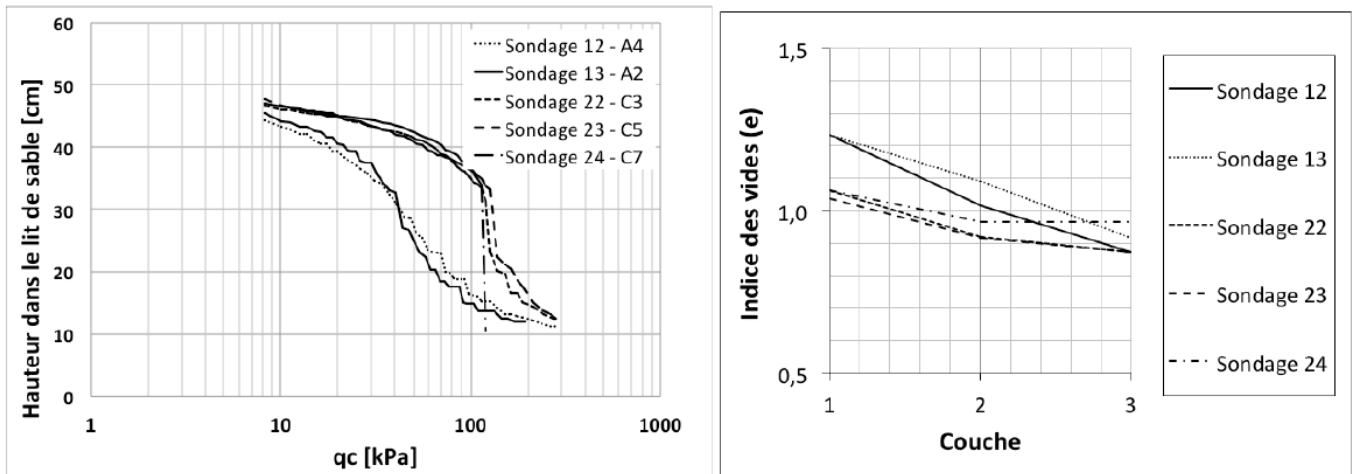


Figure 12. Comparaison de l'état de compacité initial (S12 et 13) et final (S22, 23 et 24) du lit2 et au sein des différentes couches (1, 2 et 3)

On constate également une diminution graduelle de l'indice de vides lors des premières simulations, notamment au cours des deux premières simulations faites (fig. 10).

Analyse de la teneur en air: A partir des images enregistrées au sein du canal, une estimation de la teneur en air a été estimée (rapport surfacique des bulles d'air sur la surface totale de matériau étudié) sur la hauteur des sondages endoscopiques et suite aux différentes sollicitations du lit. L'évolution de la teneur en air au sein du lit (figure 11) montre une diminution et une homogénéisation de celle-ci au fur et à mesure des simulations. La teneur en air dans la couche inférieure a tendance à diminuer du fait des remontées des bulles au cours des sollicitations. Enfin, on constate une diminution de la teneur en air de la partie supérieure du lit, partie remaniée par l'effet de la liquéfaction. Cette partie du lit devient donc complètement saturée au cours du temps et des sollicitations.

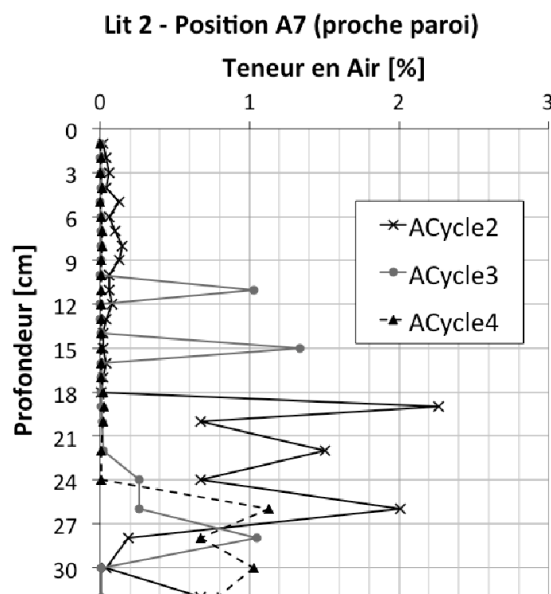


Figure 13. Variation de la teneur en air en fonction de la profondeur et des simulations (proche de la paroi du canal) Lit 2

Partenaire: LAMI

Personnes impliquées:

Permanent: Pierre Breul

Recruté sur contrat Hydrofond: Pablo Biondi (master 1 an + ingénieur 5 mois mi-temps)

Livrable #5: Rapport sur la calibration du modèle couplé pour l'application aux sédiments marins (Annexes B, B-I, B-II).

Référence #5.1: Pablo Biondi, 2012, Mémoire de stage de fin d'étude.

4.2 VOLET NUMÉRIQUE

4.2.1 OBJECTIFS

Un des objectifs majeurs d'Hydrofond était de réaliser des progrès significatifs dans la simulation numérique des interactions écoulement-sédiment au voisinage d'ouvrages. Dans cette optique la stratégie proposée était basée sur deux axes:

1/ une modélisation fine des couplages solide-fluide par le biais de modèles micro-mécaniques à l'échelle des grains de matière (méthode DEM), qui nécessitait le développement et la mise en œuvre de techniques numériques nouvelles;

2/ l'étude systématique des conditions conduisant à la liquéfaction et à l'érosion des sédiments sur la base des expériences et des simulations DEM, afin de proposer des relations empiriques pouvant être introduites dans des modèles opérationnels à plus grande échelle (logiciel Télémac).

4.2.2 DIFFICULTÉS RENCONTRÉES ET ADAPTATION DU PROGRAMME

Au fur et à mesure de l'avancement du projet, il est apparu que le second axe de travail était difficilement tenable. Cette difficulté était également suggérée dans l'évaluation à mi-parcours d'Hydrofond. Deux difficultés majeures se sont présentées, l'une méthodologique, l'autre plus technique:

- On peut formuler l'hypothèse que la liquéfaction momentanée d'un sédiment est très favorable à l'érosion du matériau. Pour autant, la liquéfaction n'entraîne pas à elle seule d'importants phénomènes de transports. On peut s'attendre à ce qu'un facteur essentiel de mouvement soit l'existence d'une vitesse de courant transverse et/ou des écoulements tri-dimensionnels au voisinage d'une structure immergée. Malheureusement, ces phénomènes étaient inaccessibles aux expériences en canal telles qu'elles étaient conçues (le premier semble même rigoureusement impossible en canal 1D). Dès lors, la relation liquéfaction-érosion ne pouvait être qu'essentiellement spéculative, ce qui affaiblissait considérablement la démarche.

- La déstabilisation de fondations immergées par liquéfaction et/ou érosion met en jeu des champs proches, d'échelle métrique ou inférieure, ainsi que des échelles de temps courtes, avec des couplages forts entre les phénomènes se produisant aux différentes échelles. Les modèles de type Télémac, prévus pour des modèles à plus grande échelle et basés sur représentations fréquentielles, s'adaptent difficilement à ces petites échelles spatio-temporelles.

Face à ces constats, il est apparu plus opportun de viser le développement d'un système de modélisation complet d'une fondation immergée. Ce système devant permettre, ultimement, des modélisations tridimensionnelles des fondations. Le système proposé repose sur la résolution simultanée de deux problèmes: écoulement turbulent dans la phase fluide libre, et problème de couplage poro-mécanique dans le sédiment. Sa mise en œuvre a reposé sur le code de calcul de dynamique des fluides Open-FOAM pour la partie turbulente (maîtrisée par Artelia), et sur le couplage DEM-PFV pour la partie sédimentaire dense (développé par 3SR). Il est à noter que la mise en œuvre d'Open-FOAM par le partenaire Artelia s'inscrit dans une stratégie globale d'évolution des outils numériques au sein de l'entreprise.

A ce stade, un couplage faible (sans rétro-action de la déformation du sédiment sur l'écoulement) a pu être réalisé (présenté dans la suite). La méthode peut cependant être généralisée au couplage fort.

4.2.3 SIMULATION NUMÉRIQUE DEM-PFV (3SR)

Pour cette première partie du volet numérique, une technique de modélisation dédiée a été développée. Ces développements résultent principalement de la thèse de Emanuele Catalano (allocation Grenoble INP) pour le modèle de fluide incompressible puis du post-doc de Luc Scholtès (financement Hydrofond) pour l'extension au fluide compressible. François Kneib a enfin été recruté comme ingénieur d'étude pour finaliser l'intégration du module de couplage fluide-solide dans la plate-forme Yade-DEM.

Modèle de fluide incompressible

Elle repose sur une représentation du matériau granulaire à l'échelle du grain, suivant la technique dite par "éléments discrets" (DEM). Ce modèle par éléments discrets a été couplé à un modèle d'écoulement fluide afin de reproduire le comportement des matériaux sédimentaires. La représentation de l'écoulement à l'échelle des vides entre particules (PFV, fig. 14) et la méthode de résolution numérique sont des développements originaux, qui sont intégrés au logiciel de simulation Yade-DEM (<http://yade-dem.org>).

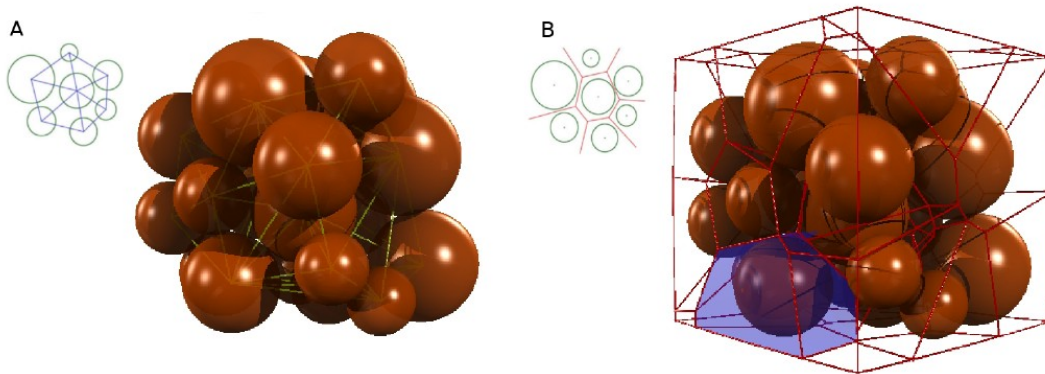


Fig 14. Représentation d'un matériau formé de grains (a), et définition des chemins d'écoulement entre particules pour simulation du fluide interstitiel (b).

La méthode couplée DEM-PFV a été mise en oeuvre pour reproduire les situations d'interaction vague-sédiment telles que celles étudiées en canal, sans prise en compte des bulles d'air dans un premier temps. La comparaison avec les expérimentations s'est révélée satisfaisante. Les phénomènes de liquéfaction, en particuliers, ont pu être reproduits dans les cas où la teneur en air ne joue pas un rôle prédominant. Les développements en cours visent la prise en compte des bulles d'air, qui étendra le domaine de validité de la méthode.

L'apport des simulations numériques par rapport aux expériences est de deux ordres:

- Les phénomènes étudiés trouvent leur origine dans les mécanismes d'interaction entre les grains du sédiment (forces de contacts entre grains) et la circulation du fluide entre les particules. Et de si petites échelles, les mesures sont extrêmement complexes; la détermination des forces de contact est même impossible en pratique. Ainsi, la simulation numérique des milieux granulaire se substitue à l'expérience pour fournir des informations inaccessibles à l'expérience.
- Par ailleurs, même si les expériences de laboratoire cherchent à assurer des similitudes entre les modèles réduits et les phénomènes qui se produisent à l'échelle réelle, des doutes subsistent quand à l'extrapolation des mesures. Les simulations numériques offrent ici la possibilité d'évaluer l'effet de la réduction d'échelle. Il est possible, après validation du modèle par rapport aux mesures sur grains synthétique de PMMA, de réaliser des calculs

représentatifs de l'échelle réelle, et de simuler des particules composées des minéraux naturels (silice essentiellement).

Etude d'ondes stationnaire

La simulation numérique a été d'abord appliquée à l'étude d'ondes de houle stationnaires (fig. 15 et 16). La liquéfaction momentanée a été reproduite par le modèle sous l'effet de ces chargements alternés (fig 17). Une étude paramétrique a ainsi pu être conduite afin d'évaluer les combinaisons fréquence-amplitude conduisant à la liquéfaction un type de sédiment donné (fig 18).

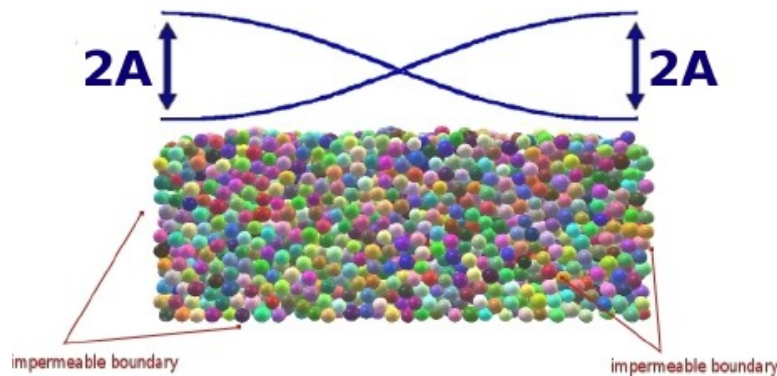


Fig 15. Modélisation d'un sédiment soumis à l'action des vagues par le modèle DEM-PFV.

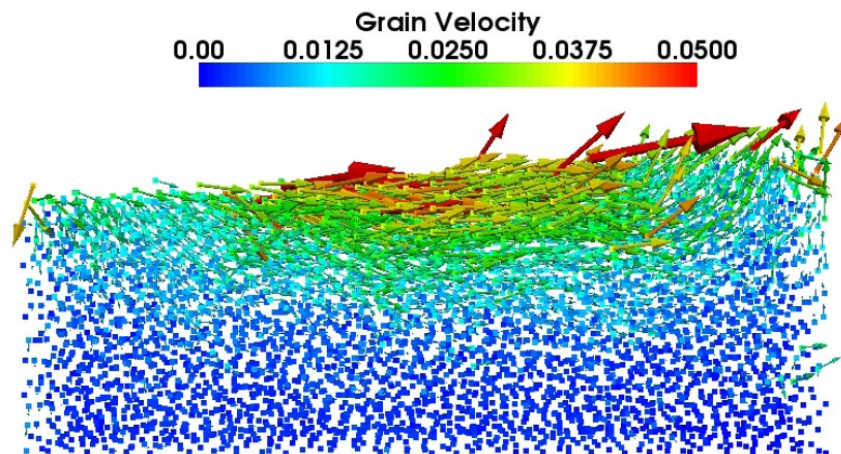


Fig 16. Déplacement des particules sous l'action d'une houle simulée.

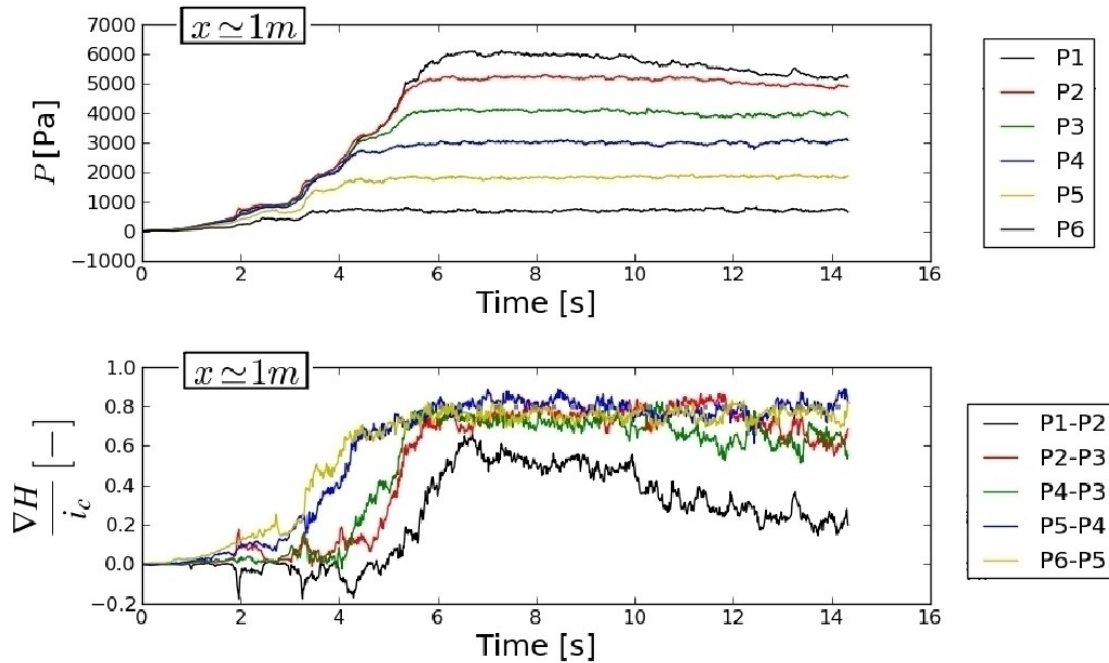


Fig 17. Evolution de la surpression à différentes altitudes (P1 à -1m sous la surface du sédiment, P6 prôche de la surface), sur l'axe vertical d'anti-symétrie, et gradients associés.

Extension au fluide compressible

L'extension du schéma numérique aux fluides compressibles a permis de prendre en compte de manière indirecte la présence de bulles d'air via la compressibilité d'un fluide saturant équivalent au mélange eau+air. Cette extension a fait l'objet du contrat de post-doc de Luc Scholtès. Les premières applications ont porté sur un cas simplifié de chargement 1D d'une colonne granulaire soumise à la gravité et à des fluctuations temporelles de la pression de fluide appliquée sur la face supérieure (fig. 18). Les conditions aux limites dans les directions horizontales sont des conditions de périodicité. Dans un premier temps, une validation vis à vis de résultats théoriques a été obtenue (fig. 18, à droite).

Après cette étape de validation, la reproduction des mesures en canal a été tentée en introduisant comme condition de pression sur la face supérieure l'évolution temporelle de pression telle que mesurée au passage d'une vague dans le canal à houle. Les deux épisodes de liquéfaction observés en canal ont pu être reproduits par le modèle: avant passage de la crête et après passage de la crête. Dans ces deux intervalles de temps, la pression à la surface du sédiment tend à décroître, ce qui induit un écoulement ascendant par décompression du fluide interstitiel (fig 19).

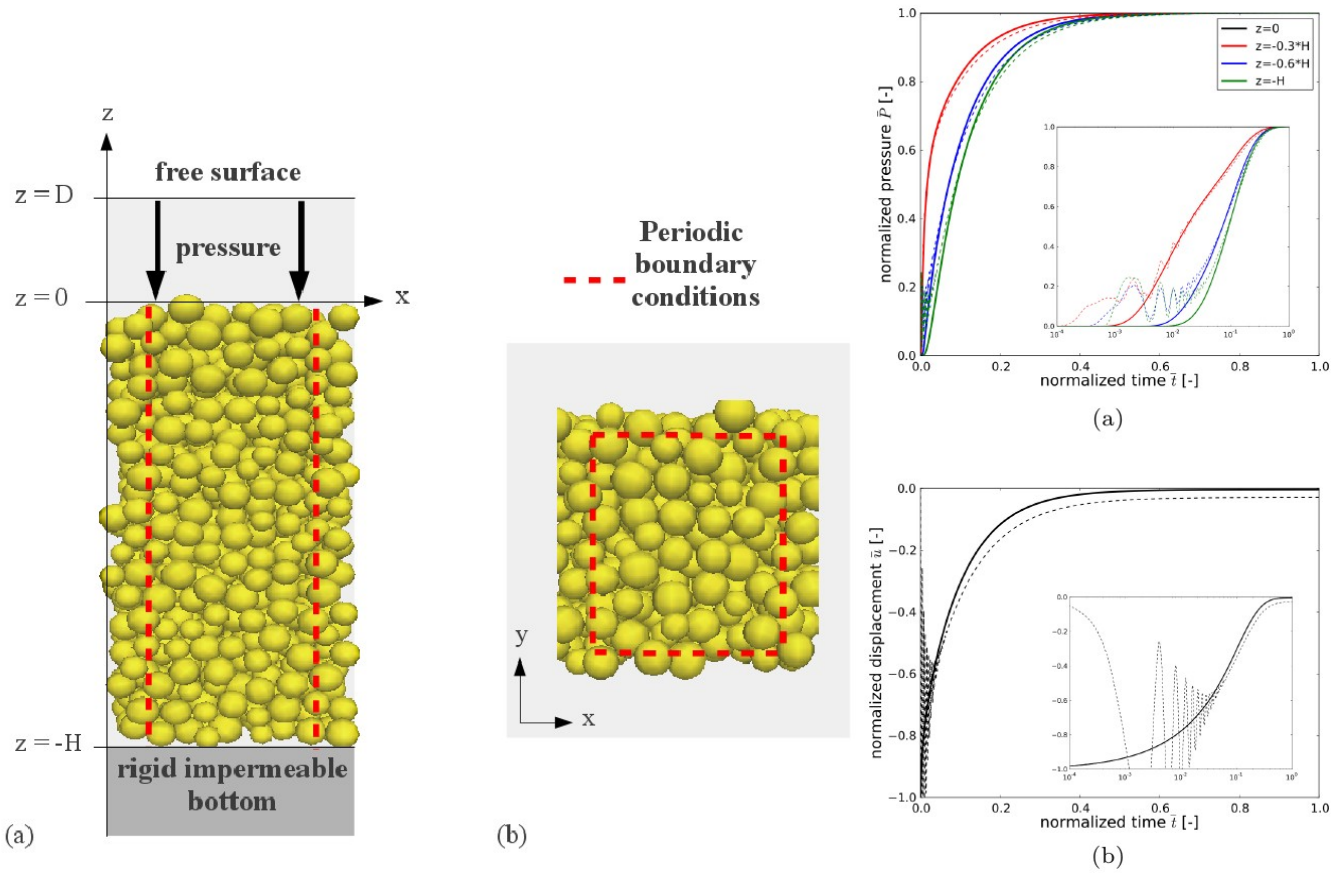
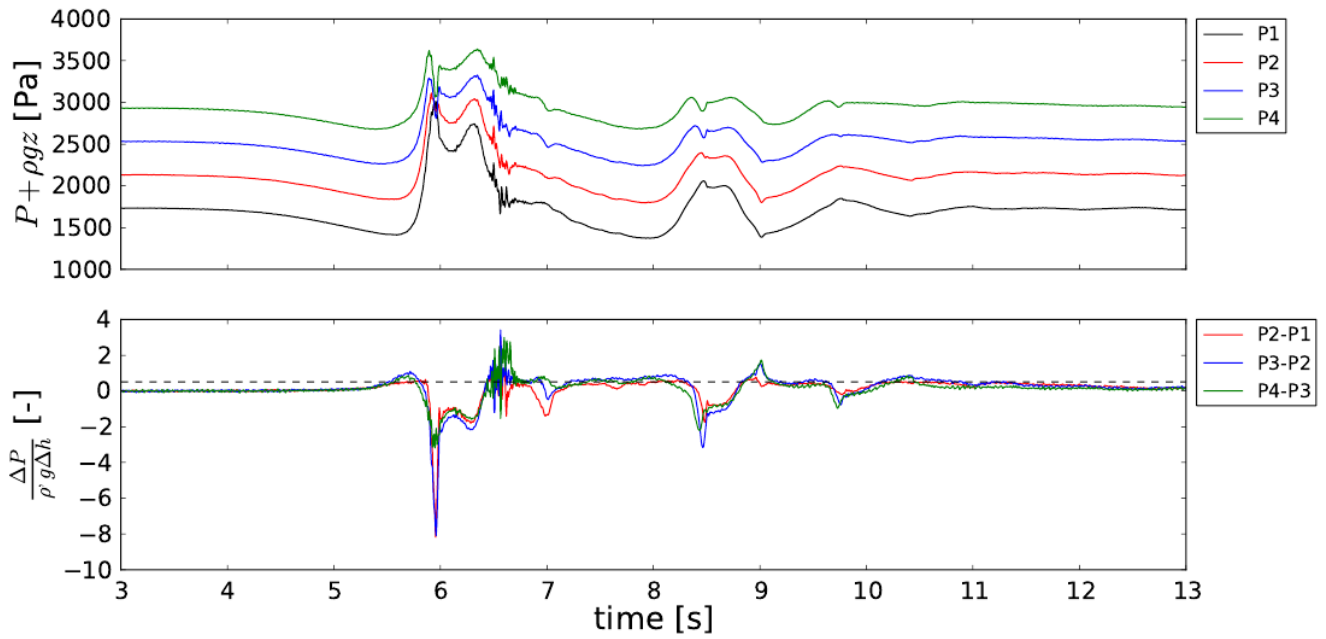


Fig 18. Gauche: géométrie d'un colonne granulaire saturée par un fluide compressible, pour la validation et l'étude des chargements hydrodynamiques; droite: validation du couplage pour palier de pression appliqué en $t=0$ et maintenu constant (solution analytique en trait continu, solution DEM-PFV en pointillés).

Expérience en canal



Simulation DEM-PFV compressible

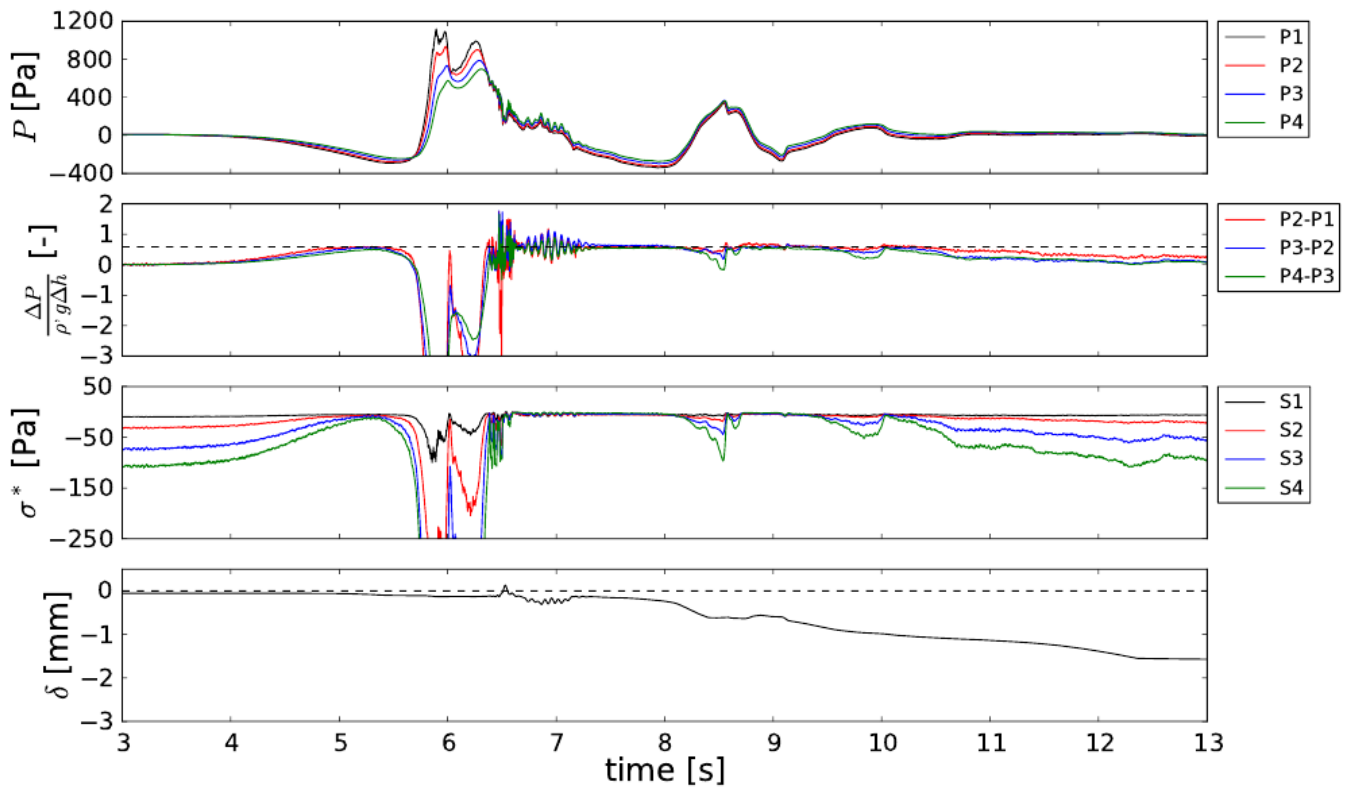


Figure 19. Pressions mesurées en canal et simulées par DEM-PFV compressible (note: la simulation donne la *surpression* tandis que l'expérience donne la pression absolue), et gradients associés.



Bilan des simulations DEM-PFV

Les simulations réalisées tant en incompressible qu'en compressible ont permis de bien mettre en évidence des processus de liquéfaction liés soit au caractère contractant du matériau sous chargement cyclique (similaire à la liquéfaction sous séisme) soit à des déphasages d'ondes de pression liés à la compressibilité du fluide. Elles sont restées cependant limitées à des cas académique (onde stationnaire sur fond plat, chargement 1D d'une colonne par pression de fluide en surface). Un obstacle à la réalisation de simulations plus réalistes tient dans le fait que les mesures de pression à la surface du sédiment ne sont faites qu'en un point (en pied d'ouvrage). Ainsi il n'est pas possible de connaître la distribution de pression de fluide dans l'espace.

Le système couplé CFD-DEM présenté ci-dessous vient combler ce manque, les calculs CFD étant à même de donner la pression en tout point et à tout instant.

4.2.4 CANAL NUMÉRIQUE CFD OPEN-FOAM (ARTELIA)

CHOIX DE L'OUTIL DE MODÉLISATION

L'outil de modélisation doit être capable de reproduire finement la propagation de la vague, et son déferlement sur l'ouvrage.

Les premiers modèles développés, tels que les modèles de Boussinesq, ne peuvent représenter correctement des vagues fortement non linéaires. Quant aux modèles à surface libre résolvant les équations de Navier-Stokes (dont TELEMAC) la qualité de leur reproduction du phénomène physique dépend fortement du modèle de turbulence résolu. D'après Lin and Liu [3], un modèle de turbulence $k-\epsilon$ de type RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), permet de propager de façon satisfaisante une vague jusqu'à la plage à condition qu'elle soit non-déferlante. Dans le cas d'une vague déferlante la turbulence peut être surestimée de 25% à 50%. Un modèle de turbulence type LES (Large Eddy Simulation) fournit de meilleurs résultats qui n'égalent cependant pas ceux d'un modèle résolvant les équations de Navier-Stokes en diphasique (représentation de l'entraînement d'air à l'interface) [4]. Actuellement, les recherches s'orientent vers ce type de code.

OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation) CFD Toolbox est un système logiciel libre et ouvert de CFD (Computational Fluid Dynamic), développé par le team OpenFOAM de la société Silicon Graphics, Inc. (SGI) et distribué par la fondation OpenFOAM. OpenFOAM possède une grande base d'utilisateurs dans la plupart des secteurs de l'ingénierie et de la science, tant des organisations commerciales qu'académiques.

En étant ouvert, OpenFOAM offre aux utilisateurs la liberté complète pour s'adapter aux besoins du client et étendre ses fonctionnalités existantes, soit par eux-mêmes soit grâce au soutien de la fondation OpenFOAM. Il s'ensuit une conception fortement modulaire du code, dans laquelle les groupes de fonctionnalités (par exemple méthodes numériques, maillage, modèles physiques, ...) sont chacun compilés dans leur propre bibliothèque partagée. Des applications exécutables sont alors créées et sont tout simplement liées à la fonctionnalité de la bibliothèque.

OpenFOAM comprend plus de 80 applications de solveurs pour simuler des problèmes spécifiques de l'ingénierie (écoulement stationnaire, écoulement à surface libre...) et plus de 170 applications utilitaires qui effectuent des tâches de pré- et post-traitement, par exemple maillage, visualisation de données, etc.

Une description plus détaillée des capacités du logiciel est disponible (en anglais) sur le site : <http://www.openfoam.com/features/index.php> ainsi que dans la documentation de l'utilisateur : <http://www.openfoam.org/docs/user>.

ARTELIA a investi depuis plus de 4 ans dans ce système logiciel à travers des projets de Recherche & Développement sur fonds propres ou à financement partagé mais également par la réalisation d'études en interne ou pour ses clients.

Emprise du domaine numérique et maillage

Afin de reproduire le canal à houle étudié dans le volet expérimental du projet, le modèle est contenu dans un parallélépipède de les dimensions :

X=11m

Y=0.01m (le modèle sera 2D, 1 seule cellule selon y)

Z=1.2m. Le canal du LEGI voit en réalité une hauteur d'eau au batteur de 0.8 m, mais pour la modélisation numérique, il est nécessaire de prolonger le domaine afin de prémunir la zone d'étude des effets purement numériques développés potentiellement aux limites du domaine.

2 vagues ont été étudiées dans le canal expérimental : les mesures recueillies vont permettre de caler le canal à houle numérique. Dans l'expérience, ces 2 vagues n'ont pas été propagées sur des fonds rigoureusement identiques (seule la vague 1 est illustrée ici) : les légères différences dues à la construction manuelle des fonds seront négligées dans la construction du canal numérique. Ainsi, les 2 vagues propagées dans le canal numériques voient le même fond. Pour sa construction, les fonds ont été légèrement lissés (fig. 20). Afin de représenter correctement la vague, il est nécessaire de disposer d'une dizaine de mailles par longueur d'onde pour décrire celle-ci. Ainsi, des mailles variant de 2.5 mm à 10mm de long compose le maillage du domaine (fig 21).

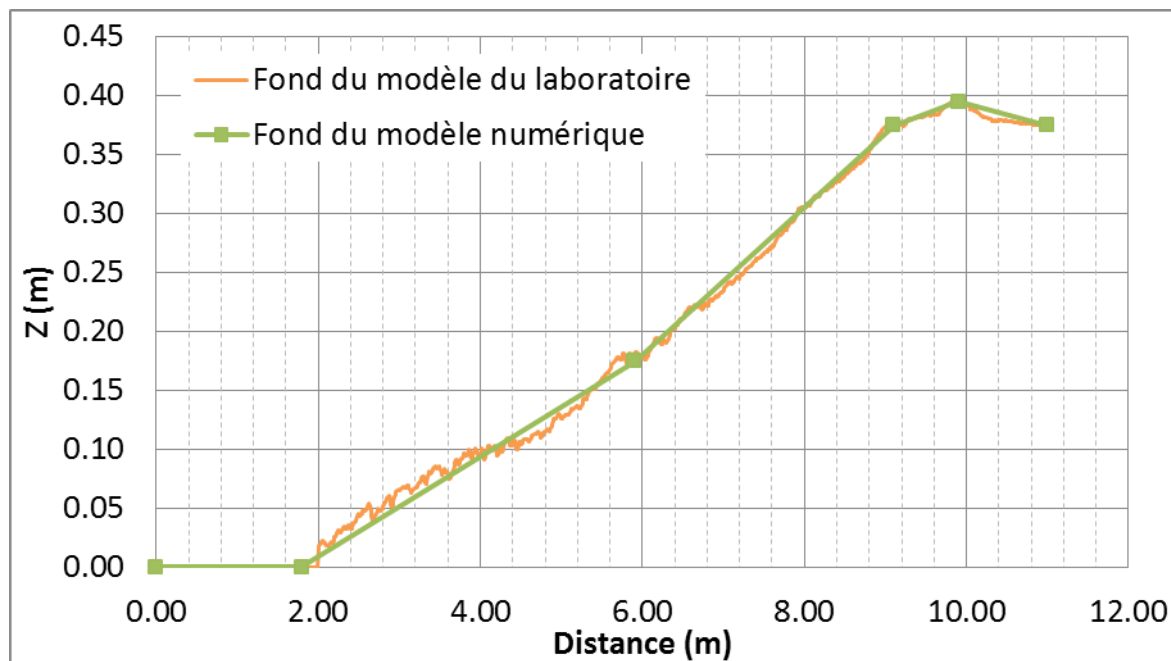


Figure 20. Géométrie du fonds – Vague 1



Figure 21. Densité du maillage (volume des mailles)

Modèle RANS

Les premières simulations ont été effectuées en considérant un modèle k-omega SST. Ce modèle est plus adapté qu'un modèle k- ϵ (meilleur en cisaillement) pour l'étude de l'impact sur le mur. Les résultats sont présentés sur les figures ci-après. L'évolution des niveaux d'eau calculés au droit des différents points sondes sont représentés en comparaison des niveaux d'eau mesurés en laboratoire.

On constate un fort ralentissement de l'onde par rapport à l'expérience. La viscosité turbulente calculée est trop forte. Des tests complémentaires sont réalisés considérant des modèles de turbulence de type RANS, notamment un modèle k- ϵ bas-Reynolds, cela sans obtenir une meilleure concordance avec les mesures. De plus, les résultats dépendent de la taille de mailles : plus le domaine est maillé finement, plus la propagation de l'onde est lente et diffère des mesures. Les modèles RANS ont donc été abandonnés au profit des modèles LES.

Modèle LES

3 types de modèles LES, codés dans OpenFoam, sont testés :

- OneEqEddy, cf Chai et al, [9]
- Smagorinsky, cf [Fureby](#) et al, [10]
- Spallart-Almaras, cf Dacles-Mariani et al [11], Spalart et al. (1992) [12], Spalart et al. (1994) [13].

Les résultats du dernier modèle ne sont pas présentés : la viscosité turbulente appliquée à l'écoulement est restée nulle au cours du calcul.

Les figures 22 et 23 présentent l'évolution des niveaux d'eau calculés au droit des différents points sondes en comparaison des niveaux d'eau enregistrés par l'expérience en laboratoire. Les résultats du calcul sans modèle de turbulence sont également présentés (laminaire). Il est constaté que la turbulence a peu d'effet, sauf au niveau du dernier point sonde, situé 3cm en amont du mur.

Les résultats obtenus par les 2 modèles LES sont très proches. Les résultats des calculs numériques présentent une légère avance sur les mesures du modèle physique (de l'ordre de 0.1 s). L'avance que l'on observe sur les 2 vagues apparaît à la sonde située à $X=2$ m. Cette avance ne s'amplifie pas pendant la propagation des 2 vagues le long du chenal. Ce léger décalage est donc probablement à imputer au batteur.

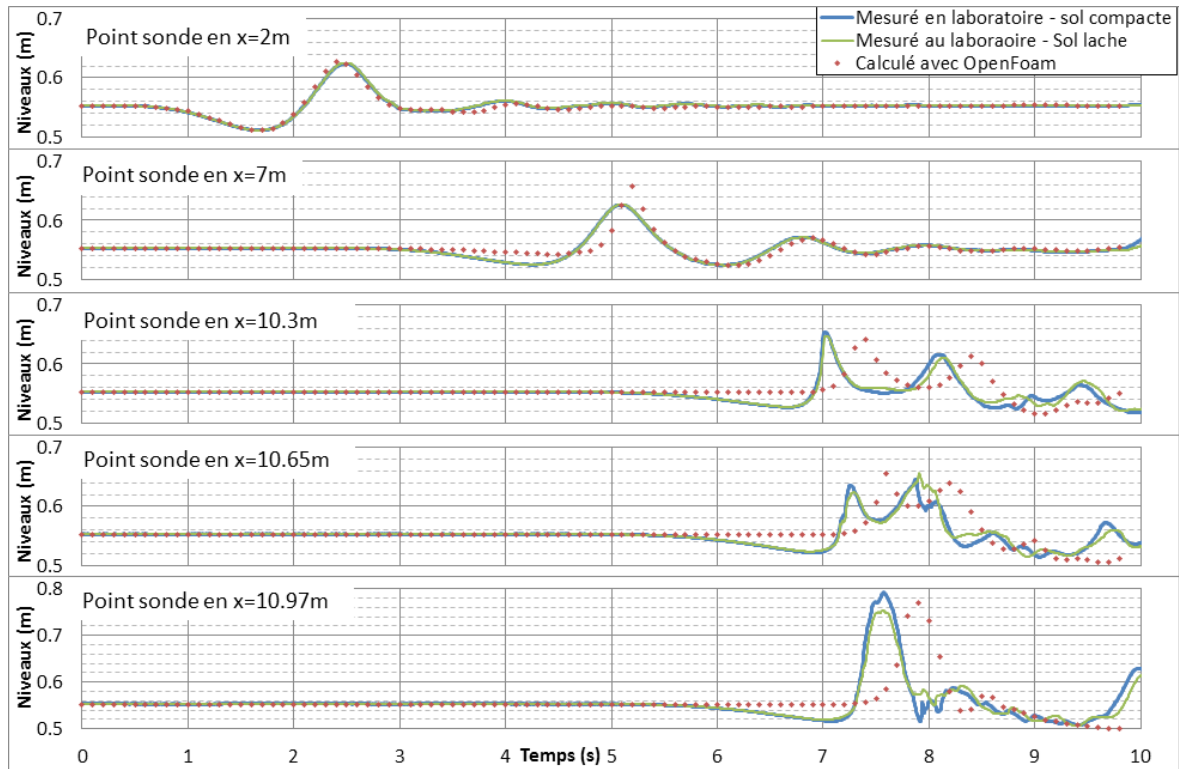


Figure 22. Effet du modèle de turbulence k-omega-SST sur les niveaux – Vague 1

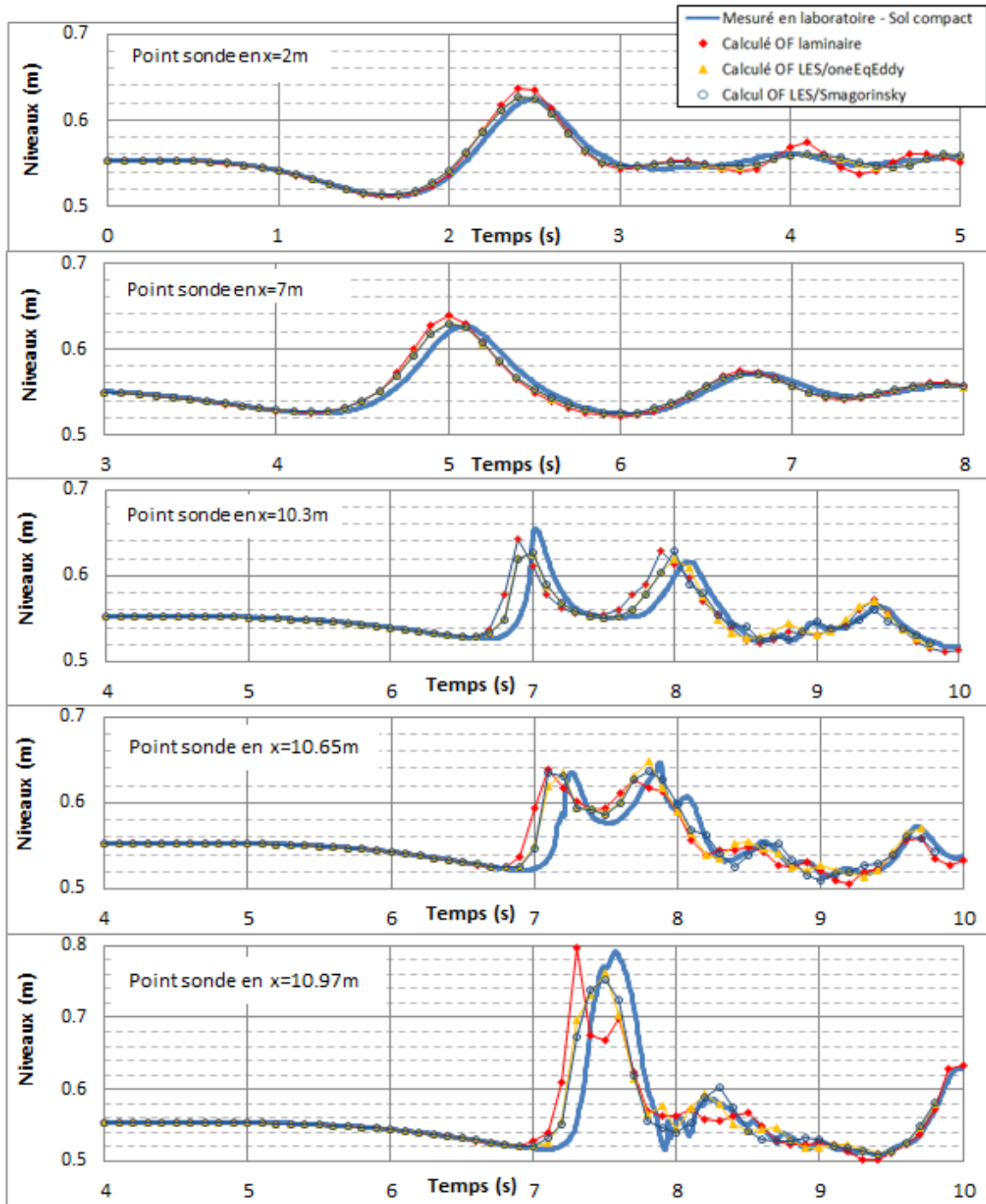


Figure 23. Effet du modèle de turbulence sur les niveaux – Vague 1

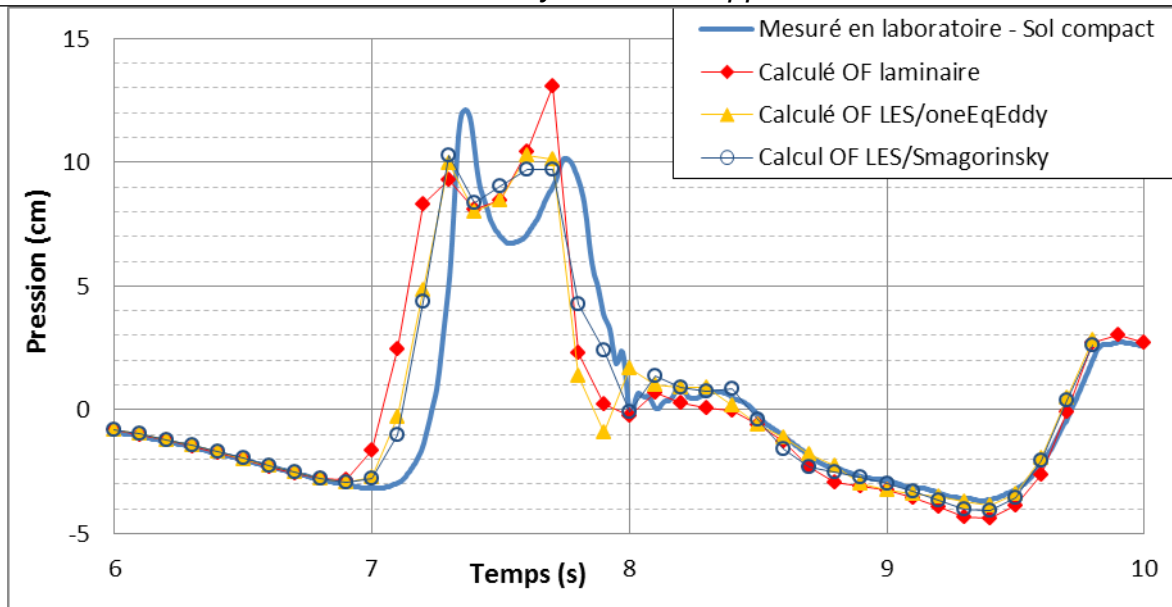


Figure 23. Effet du modèle de turbulence sur la pression au pied du mur vertical – Vague 1

Exploitation du modèle

Les intérêts de mettre en place un canal à houle numérique sont :

D'une part, d'obtenir une information spatialisée du champ de pression au niveau du sol en amont de l'ouvrage, selon une discrétisation en d'espace plus fine que ne le permettrait un banc de mesure expérimental ;

D'autre part, de réaliser le nombre important d'essais que nécessite une étude paramétrique, cela plus aisément qu'au moyen d'un banc de mesure expérimental. Une fois le modèle numérique calé et la transmission des champs de pressions au modèle de sol mise en place, il est possible de tester différentes configurations d'ouvrages et de houles afin d'investiguer, dans une première approche, leur rôle dans la liquéfaction d'un sol et de poser les premières bases de formules paramétriques régissant le comportement du sol. La batterie d'essais nécessaires à cette fin est bien plus fastidieuse et longue à mettre en place sur un modèle physique.

Effet du type d'ouvrage sur la pression dans le sol

La pression en pied d'ouvrage est calculée pour un ouvrage vertical, un ouvrage de pente 3H/4V et un ouvrage de pente 2H/1V. La houle simulée est la vague précédemment étudiée, dite Vague 1.

Les résultats sont présentés sur le graphique ci-après. On constate que les gradients de pressions sont moindres en pied d'ouvrages plus inclinés, mais que des pressions soutenues sont appliquées plus durablement sur le sol en pied d'ouvrages plus inclinés.

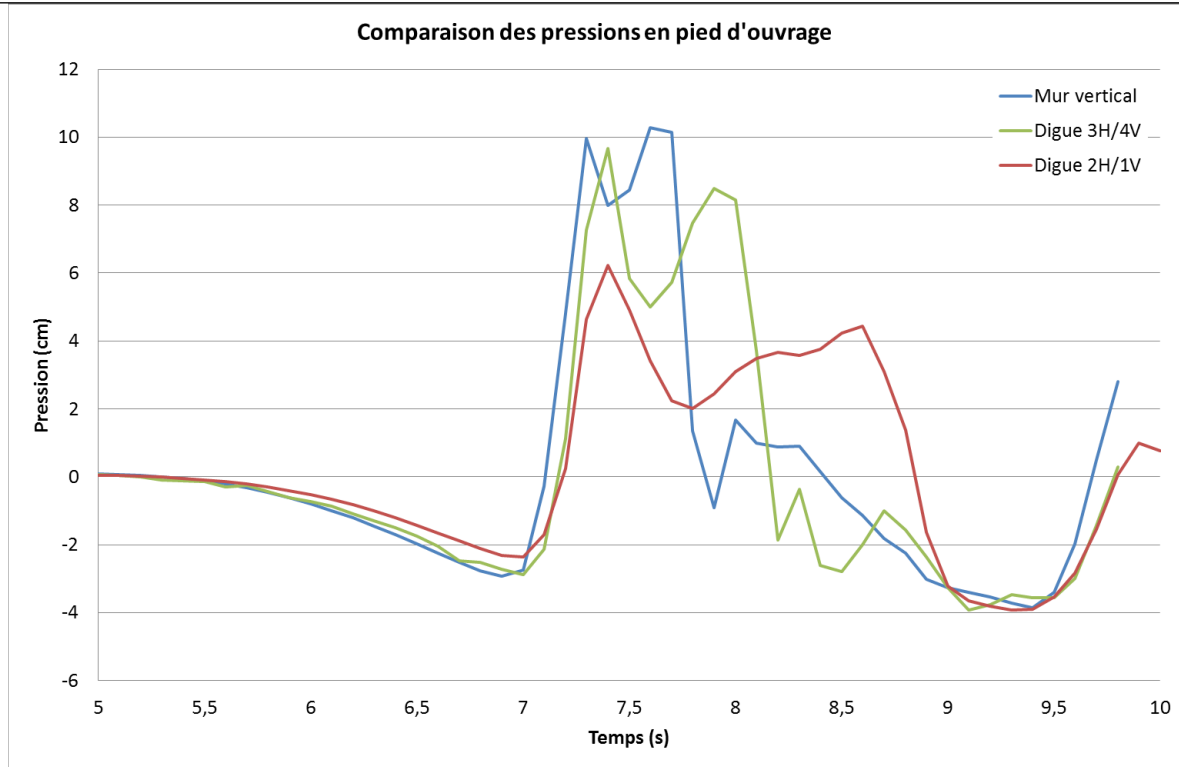


Figure 24. Evolution des pressions en pied d'ouvrage en fonction de la pente de l'ouvrage

Dans un second temps nous avons réalisé des simulations pour un ouvrage de pente 3H/4V au cœur duquel nous avons mis en place un système de capture de l'énergie de la houle (Oscilating Water Column (OWC)). Les résultats sont présentés sur la figure ci-dessous. On constate que l'OWC diminue fortement la pression en pied d'ouvrage lié au second pic, une partie de l'énergie étant absorbée par l'OWC lorsque la houle repart.

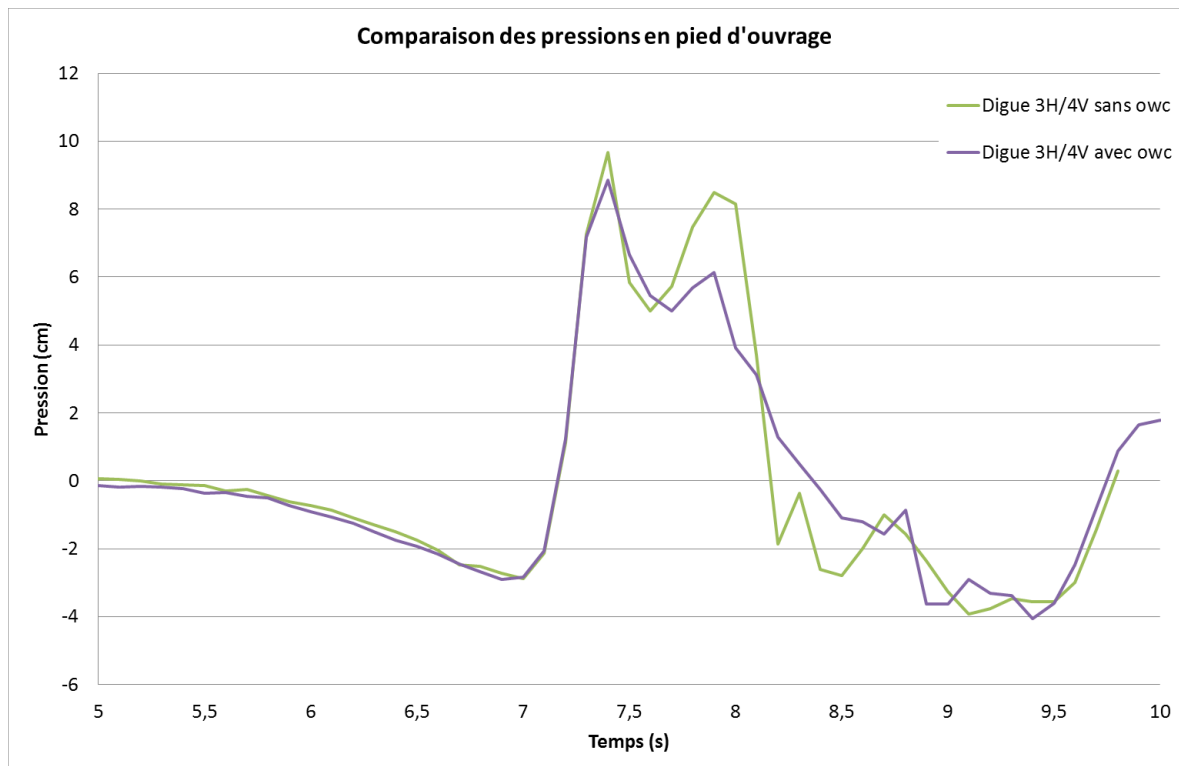


Figure 25. Evolution des pressions en pied d'ouvrage pour un ouvrage équipé d'un OWC

4.2.5 COUPLAGE CFD-DEM (ARTELIA/3SR)

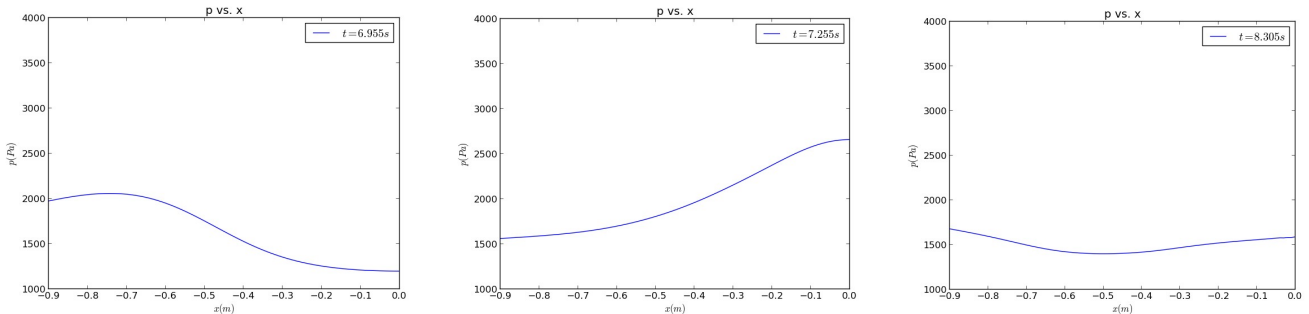


Figure 26. Champs de pression issu des calculs CFD (vague 1) et appliqué à la surface du sédiment DEM, représenté à différents instants ($t=6.95s$, $7.25s$, $8.30s$).

Couplage faible CFD-DEM-PFV

Les chroniques de champ de pression calculées en pied d'ouvrage sont transmises au modèle de sol DEM-PFV comme une condition à la limite variable en temps et en espace (fig. 26). La réponse du sédiment à ce champ de pression est analysé pour un sédiment lâche et compacté, saturé ou non (soit 4 cas au total). Les champs de pression de fluide, de contrainte effective, ainsi que les déformations du sédiment peuvent être obtenus à tout instant de la simulation.

La figure 27 représente ce type de résultat pour le calcul représentatif du sédiment dense non-saturé. L'image est obtenue au moment où la pression en pied d'ouvrage atteint son premier pic ($t=7.25s$). Les surpressions sont notables en profondeur du sédiment, et le champ de vitesse des particules est du même type que les vitesses observées expérimentalement (fig. 5).

L'évolution des pressions dans ce calcul et les gradients de pression en pied d'ouvrage sont représentées dans les figures XXX et YYY. Il est notable que la liquéfaction n'est réellement atteinte (gradient normalisé ≥ 1) qu'après passage de la vague en toute fin de simulation, tandis que le gradient n'atteint que 50% du seuil de liquéfaction dans les instants qui précèdent l'impact de la vague, moment où les déformations du sédiment sont les plus importantes. Ceci peut s'expliquer par le fait que le passage du pic de pression induit des forts gradient horizontaux qui, même associés à une surpression modérée, peuvent générer des mouvements plus importants que le champ de pression post-déferlement, exercé sur un sédiment liquéfié mais beaucoup plus uniforme en espace.

Ce constat met en évidence la complexité des processus. Un critère de liquéfaction ne peut à lui seul déterminer les mouvements du sédiment. C'est le produit de la surpression par les sollicitations extérieurs qui conduit ou non à des mouvements significatifs.

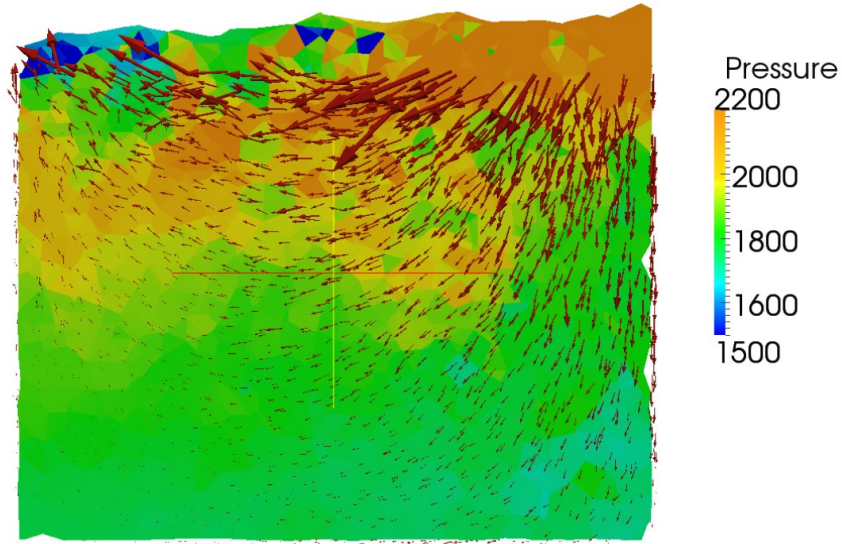


Figure 27. Champs de pression et champs de vitesse des particules pour vague 1 à $t=7.25s$

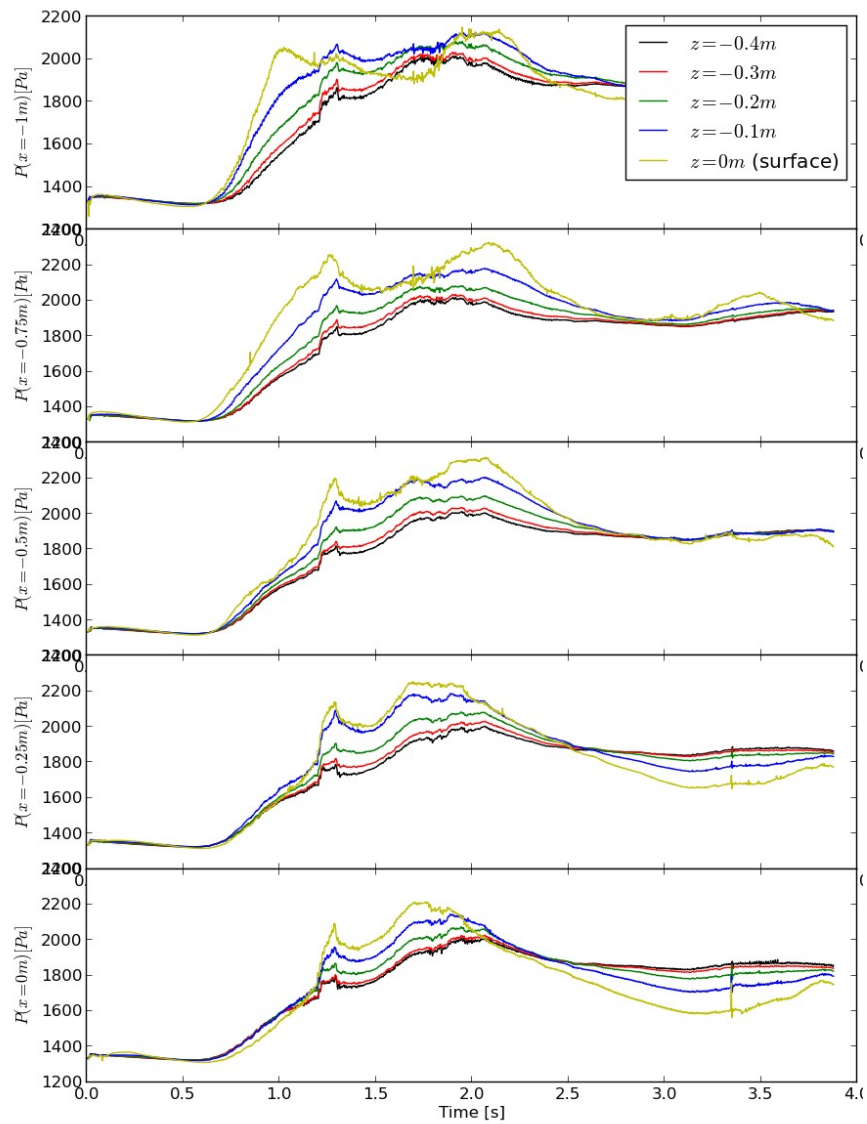


Figure 28. Évolution simulée de la pression dans le sédiment dense non-saturé sous la vague 1, pour différentes abscisses et différentes altitudes.

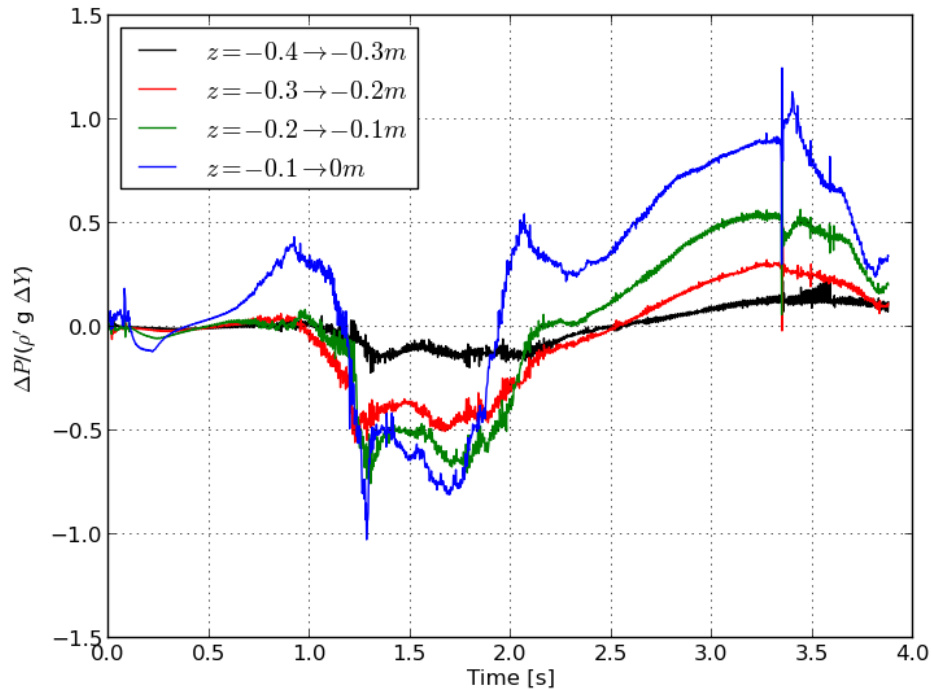


Figure 29. Gradients de pression en pied d'ouvrage dans le sédiment dense non-saturé sous la vague 1. Le critère de liquéfaction théorique est à l'ordonnée 1.0.

Perspective: vers le couplage fort

Les résultats du couplage faible ont paru prometteur et ont conduit les partenaires à envisager à la suite d'Hydrofond une poursuite des travaux allant vers un couplage fort entre le canal numérique CFD et le modèle de sol DEM-PFV. Le principe d'un tel couplage a été dégagé. Il consiste à chaque itération, à calculer la pression au fond du canal résultant de la houle propagée, transmettre cette pression en condition limite du modèle sol qui calculera les écoulements interstitiels et les flux entrants ou sortant à la surface de l'échantillon. Ces flux seront à leur tour transmis au canal à houle numérique comme conditions de débit entrant ou sortant au niveau du fond du canal. Ce couplage ne devrait pas représenter une augmentation significative des coûts de calcul dans la mesure où les deux techniques de calcul représentent des temps de calcul du même ordre et suivent toutes deux un schéma d'intégration explicite.

5. LIVRABLES

Livrables prévus
A1. Version téléchargeable de la plate-forme Yade intégrant le support pour le développement+documentation du module « couplage », 3SR
A2. Code de calcul DEM-VF (non-calibré) hors calibration des paramètres locaux pour le non-saturé), 3SR
A3. Rapport : étude paramétrique préliminaire DEM-VF, 3SR
A4. Rapport global d'avancement année 1, 3SR
A5. Rapport d'étude sur le développement et la calibration des méthodes de caractérisation du matériau granulaire et de la teneur en air SOLSOLUTION/LaMI
A6. Rapport d'étude : champs de pression et cinématique du sédiment saturé en pied d'obstacle sous l'effet du déferlement, LEGI
A7. Rapport d'essais sur la caractérisation en place de la teneur en air SOLSOLUTION/LaMI
A8. Stage de formation aux outils numériques - Grenoble, 3SR
A9. Rapport global d'avancement année 2, 3SR
A10. Rapport d'étude : champs de pression et cinématique du sédiment non-saturé en pied d'obstacle sous l'effet du déferlement + mesures de teneur en air, LEGI/SOLSOLUTION/LaMI
A11. Code du module DEM-VF (calibration des paramètres locaux pour le non-saturé), 3SR
A12. Rapport final : Erosion et liquéfaction en pied d'obstacle en régimes de houle, LEGI/3SR
A13. Logiciel TELEMAC intégrant les avancées du projet, SOGREAH
A14. Rapport final : Modélisation opérationnelle des processus d'érosions externes, SOGREAH/LEGI
A15. Rapport final global, 3SR
A16. CD-ROM bootable permettant l'utilisation directe du module « couplage » de Yade, sur PC standard, sans procédure d'installation, avec interface graphique utilisateur, 3SR

A1.

Le support pour le module de couplage solide-fluide a été mis à disposition des partenaires dès le début du contrat, par l'intermédiaire du site d'hébergement launchpad

Livrable A1: accès au code open-source yade <https://launchpad.net/yade>.

A2.

Le développement du modèle de couplage a été effectué par 3SR, notamment dans le cadre de la thèse de Emanuele Catalano. Cette thèse, co-encadrée par E. Barthélémy et B. Chareyre et soutenue en juin 2012 était financée hors Hydrofond. Elle a été suivie d'un recrutement en PDoc sur financement Hydrofond.

La documentation du module fluide est générée localement après compilation du code de calcul.

Livrable A2: Code de calcul couplé téléchargeable comme module additionnel du code Yade, <https://yade-dem.org/doc/>

Référence #2.2: Emanuele Catalano, 2012, Thèse de l'université de Grenoble.

A3.

Après calibration du modèle couplé (ref. #3.1), l'interaction vague-sédiment a été étudié par simulation numérique. Ces travaux ont constitué une partie de la thèse de E. Catalano. Les résultats sont synthétisés dans le rapport (livrable #3) de l'annexe A. Une présentation plus complète est disponible dans le mémoire de thèse de E. Catalano (#3.2).

Livrable #3: Rapport sur la calibration du modèle couplé pour l'application aux sédiments marins (Annexe A).

Référence #3.1: Chareyre et al. 2012, *Transp. in Porous Media*.

A4 - A9

Le rapport évalué par le comité scientifique C2D2 à mi-parcours se substitue aux rapports intermédiaires, conformément aux décisions prises lors de la réunion des partenaires du 20/05/2011.

A5

Voir rapport LAMI A5

A6

Voir rapport LEGI A6

A7

Voir rapports LAMI A7

A8

Workshop 3SR, sept. 2012, co-financé par le projet européen ITN Mumolade

A9

Voir A4

A10

Inclu dans rapport LEGI A6

A11

Code du module « couplage » téléchargeable:

<http://bazaar.launchpad.net/~yade-pkg/yade/git-trunk/files/head:/pkg/pfv/>

A12

Voir rapports LEGI A12 et 3SR A12

A13-A14

Voir adaptation du programme de travail (section 4.2.2 du présent document)

Remplacé par le rapport ARTELIA A13 et ARTELIA/3SR A14.

A15

Présent rapport.

A16

Image disque « iso » téléchargeable à

http://geo.hmg.inpg.fr/~chareyre/hydrofond/doc/livrables/A16/hydrofond_bootable.dd

Gravure sur clef usb (minimum 8Go) ou CD-ROM commentée dans le fichier README du répertoire livrables/A16.

Site web

Le site internet «C2D2 - Hydrofond» est accessible depuis 2012 à l'adresse <http://geo.hmg.inpg.fr/~chareyre/hydrofond>. Il centralise les documents internes du projet dans une partie à accès restreint, et offre une bonne visibilité au programme de recherche dans une partie publique.

6. PUBLICATIONS

Journaux Internationaux (parus)

- B. Chareyre, A. Cortis, E. Catalano, and E. Barthélémy. Pore-scale modeling of viscous flow and induced forces in dense sphere packings. *Transport in Porous Media*, 92:473–493, 2012.
- E. Catalano, B. Chareyre, and E. Barthélémy. Pore-scale modeling of fluid-particles interaction and emerging poromechanical effects. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013. doi:10.1002/nag.2198.
- L. Scholtès, B. Chareyre, H. Michallet, E. Catalano and D. Marzougui, Modeling Wave Induced Pore Pressure and Effective Stress in a Granular Seabed, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2014, doi:10.1007/s00161-014-0377-2

Proceedings de conférences internationales à comité de lecture

- E. Catalano, B. Chareyre, A. Cortis, and E. Barthélémy. *A pore-scale hydro-mechanical coupled model for geomaterials*. In E. Onate and D.R.J. Owen, editors, *II International Conference on Particle-based Methods - Fundamentals and Applications*, pages 1–12, Barcelona, Spain, Nov 2011.
- E. Catalano, B. Chareyre, A.T. Tong, and E. Barthélémy. Microscale modelling for the study of hydromechanical properties of geomaterials. In *Alert Geomaterials Workshop 2011*, Aussois, France, Oct 2011.
- B. Chareyre, E. Catalano, and E. Barthélémy. Numerical simulation of hydromechanical couplings by combined discrete element method and finite-volumes. In *International Conference on Flows and Mechanics in Natural Porous Media from Pore to Field Scale*, page 4p, Rueil-Malmaison, France, Nov 2011.
- H. Michalet, E. Catalano, C. Berni, B. Chareyre, V. Rameliarison, E. Barthélémy, 2012, *Physical and Numerical Modelling of Sand Liquefaction in Waves Interacting with a Vertical Wall*, in 6th International conference on Scour and Erosion.
- H. Michalet, B. Chareyre, V. Rameliarison, C. Berni, M. Bergonzoli, J.M. Barnoud, E. Barthélémy, 2012, *Physical modeling of sand liquefaction under wave breaking on a vertical wall*, *International Conference on Coastal Engineering 2012*.
- E. Catalano, B. Chareyre, and E. Barthélémy. Dem-pfv analysis of solid-fluid transition in granular sediments under the action of waves. In *Powders and Grains 2013: Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media*. AIP Conference Proceedings, volume 1542, pages 1063–1066, Sydney, Australia, 2013. AIP.

Communications orales à des conférences internationales

Exposé Invité:

- B. Chareyre. *Micro-poromechanics: recent advances in numerical models and perspectives*. In *ICACM symposium 2012, The role of structure on emerging material properties*, New York, USA, June 2012.

Conférences nationales, séminaires

- B. Chareyre and E. Catalano. Méthode PFV-DEM. In *Colloque Modélisation numérique des mélanges grains-fluides*, Montpellier, France, October 2012.
- B. Chareyre. 2012, *Microporomécanique : formulation et simulation numérique*. Journées thématiques du GdR MeGe, Lyon, France, Mars 2012.
- B. Chareyre, E. Catalano, Tong A.T., and E. Barthélémy, 2011, *Particle based modeling of granular-fluid mixtures: from porous media to suspensions via solid-fluid transition*. In *Granulaires Immergés et Suspensions en Ecoulement - GISEC33*, Pessac, France, Nov 2011.

V. Rameliarison, H. Michalet, C. Berni, M. Bergonzoli, J.M. Barnoud, E. Barthélémy, 2012, *Modélisation physique de la liquéfaction au pied d'une structure côtière*, in Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier 2012, Paris.

Thèses et mémoires

Emanuele Catalano, 2012, *A pore-scale coupled hydromechanical model for biphasic granular media. Application to granular sediment hydrodynamics*, thèse de l'université de Grenoble.

Pablo Biondi, 2012, *Caractérisation en place des géomatériaux soumis aux effets hydrodynamiques de la houle*, mémoire de fin d'étude, Polytech' Clermont Ferrand.

V. Rameliarison, 2012, *Etude du déferlement de la liquéfaction du sédiment en pied d'obstacle*, rapport de Master 2 Recherche, Université de Grenoble.

5. Dépenses / personnel (inclus hors financement C2D2)

L'état des frais engagés sur financement C2D2 est donné dans le tableau 1 ci-dessous sous-réserve de validation définitive par les services financiers de certain des partenaires. Dans l'attente de cette validation, les montants ont un caractère indicatif.

Les personnels recrutés à ce jour sur financement C2D2 sont:

- Luc Sholtès, PDoc, 3SR/LEGI, 7 mois.
- Emanuele Catalano, PDoc, LEGI, 4 mois.
- François Kneib, Ing. d'étude, 3 mois
- Pablo Biondi, stagiaire ingénieur, 6 mois.

Mentionnons également l'implication dans le projet Hydrofond de personnel financé hors programme C2D2:

- Emanuele Catalano, doctorant, 3SR, 12 mois.
- Valérie Rameliarison, stagiaire M2R, LEGI, 4 mois.
- Tim Nagel, stagiaire M2R, LEGI, 4 mois.
- Céline Berni, Thèse/ATER, LEGI, 18 mois.

Tableau 1. Montant prévisionnels initiaux, aide demandée à la DRI, et dépenses à mi-parcours.
Montant prévisionnel des dépenses (En k€)

	P 1. 3SR	P2. LEGI	P3. LAMI	P4. Sogreah	Ensemble des pa	
Temps passés (h.m) – (
Personnel permanent	7	7	1.5	10	25.5	Tp1
Personnel non permaner	7	7	6	6	26	Tp2
Coûts de personnel – (f	63.6	64.7	31.1	86.4	245.8	
Personnel permanent	36.2	37.3	7.7	80.8	161.9	Cp1
Personnel non permaner	27.4	27.4	23.5	5.6	83.9	Cp2
Frais d'exploitation – (	20.5	33	47	3	103.5	
						Ce
Total Fonctionnement	84.1	97.7	78.1	89.4		
Equipement – (d)	0	0	0	0		
Frais Généraux	1.9	2.4	2.8	58.8	66.0	Cq
TOTAL HT	86.0	100.1	81.0	148.2	415.2	CHT
TOTAL TTC	90.0	106.5	90.2	177.2	463.9	CTTC

Aide sollicitée auprès de la DRI (en k€)

	P 1. 3SR	P2. LEGI	P3. LAMI	P4. Sogreah	Ensemble des pa	
Coûts de personnel – (f	27.4	27.4	23.5	25.9	104.2	
Frais d'exploitation – (	20.5	33.0	47.0	0.9	101.4	
Equipement – (c)						
Frais Généraux (*)	1.9	2.4	2.8	17.6	24.8	
TOTAL HT	49.8	62.8	73.3	44.4	230.4	
TOTAL TTC	53.82	69.26	82.47	44.40	249.9	

Dépenses à mi-parcours (en k€)

	P 1. 3SR	P2. LEGI	P3. LAMI	P4. Sogreah	Ensemble des pa	
Coûts de personnel – (f	24.4	13.9		-	38.3	
Frais d'exploitation – (	9.6	8.7	11.5	-	29.8	
Equipement – (c)						
Frais Généraux (*)	1.9	2.4	2.8	-	7.1	
TOTAL HT	35.9	25.0	14.3	-	75.2	
TOTAL TTC	37.77	26.70	16.54	-	81.0	

Les dépenses par catégorie sont détaillées ci-dessous (voir annexe financière pour listes détaillées).

3SR

Personnel non permanent	29328€
Frais d'exploitation	15917€
Equipement	8466€
TOTAL TTC	53926€

LEGI

Personnel non permanent	14672€
Frais d'exploitation	37799€
Equipement	18514€
TOTAL TTC	70987€

LAMI

Personnel non permanent	8335€
Frais d'exploitation	33587€
Equipement (HT)	28909€
TOTAL TTC	83086€

ARTELIA (SOGREAH)

Personnel permanent (HT)	87624€
Personnel non permanent	581€
Frais d'exploitation et de structure	60026€
TOTAL HT	148259€

OBSERVATIONS DES RELECTEURS ET RÉPONSES APPORTÉES

Commentaire général des partenaires

Nous tenons à remercier les rapporteurs pour leur lecture attentive et pour leurs commentaires écrits et oraux, pertinents et constructifs. Des réponses sont apportées ci-dessous aux points soulevés par écrits.

Observations générales

§1.1 Le rapport apparaît bien construit ; les expériences et simulations numériques présentées sont globalement pertinentes. On regrette toutefois que la capacité du modèle numérique à reproduire les essais en laboratoire (en matière de surpression ou de sous-pression dans les sols notamment) n'ait pas été davantage étayée ou explicitée dans le rapport.

1.1. La comparaison expérience-simulation en terme de pression porale n'est possible qu'au niveau de la paroi car c'est le seul endroit où des capteurs sont disposés en dessous du niveau du lit. A cette position, des comparaisons ont été présentées par Scholtès et al. (2014), elles apparaissent dans la figure 19 du rapport. Scholtès et al. ne présente qu'un cas test (vague déferlante sur sédiment non saturé). Des comparaisons sur une plus large gamme de cas – et ne se limitant pas à la pression porale – restent à finaliser et publier. A ce stade il était difficile de les synthétiser.

§1.2 Sur le volet expérimental, le programme prévoyait la mise en œuvre d'instruments de mesure utilisables sur le terrain. Or l'exploitation du pénétromètre panda et du géoendoscope est restée marginale dans le cadre du projet. La mise au point d'une méthode de mesure de teneur en air n'a pas abouti alors qu'il s'agissait d'un des verrous technologiques à lever.

Le matériau synthétique de densité très faible utilisé dans les expériences a effectivement causé des difficultés spécifiques qui ne sont pas rencontrées en conditions réelles (explicitées en page 13). L'analyse d'image pour la teneur en air, en particulier a été empêchée par les propriétés colorimétriques défavorables. Il n'a malheureusement pas été possible de remédier à ce problème.

§ L'intégration opérationnelle du module DEM dans le logiciel Telemac a été abandonnée. C'est très regrettable car le transfert des résultats académiques vers l'industrie était l'un des objectifs centraux de ce projet. Artelia a remplacé sa contribution attendue par un travail de réalisation d'un canal à houle numérique utilisant la plateforme CFD OpenFOAM, dont on peine à cerner la véritable valeur ajoutée dans le cadre du projet. On notera par ailleurs que la partie consacrée aux colonnes d'eau oscillantes est hors sujet. Enfin, l'exploitation des résultats qui est faite par Artelia dans les rapports et annexes apparaît très réduite.

Rétrospectivement, l'intégration des résultats dans un modèle régional de type Telemac apparaît comme un problème mal posé. La séparation des échelles spatiales et temporelles est trop grande : si l'échelle régionale peut définir des conditions aux limites, elle ne peut en revanche pas traduire les processus qui se produisent au voisinage immédiat d'une fondation.

Pour autant, la ré-orientation du volet numérique ne doit pas être vue comme un abandon du transfert vers l'industrie. Au contraire, il nous semble que le couplage multiméthodes CFD-DEM est une voie d'avenir pour l'étude des phénomènes d'érosion/liquéfaction à l'échelle d'ouvrages. Scientifiquement novatrice, la démarche aboutit à une méthode

directement applicable en ingénierie et cohérente avec la stratégie numérique du partenaire Artelia.

§ Le rapport comporte encore quelques coquilles et erreurs orthotypographiques auxquelles une relecture attentive devrait permettre de remédier.

Le rapport a été revu et corrigé.

Remarques particulières

§1 Le modèle DEM-PFV simule les pressions interstitielles jusqu'au critère de liquéfaction. Le modèle calcule-t-il le comportement post-liquéfaction ? Est-il capable de décrire la transition entre un milieu poreux et une suspension dense ?

Oui. Le schéma en dynamique explicite est insensible aux phénomènes qui peuvent représenter des limites dures pour les approches postulant équilibre statique et unicité de solution (post-liquéfaction, localisation, transitions dynamiques,...). Il n'y a pas non plus de limite sur l'amplitude des déplacements et des déformations dans la mesure où le schéma est de type lagrangien actualisé.

On peut pour s'en convaincre se reporter à un article récent, basé sur une méthode PFV étendue (déformation jusqu'à 500 % de suspensions denses) :

Marzougui, D., Chareyre, B., & Chauchat, J. (2015). Microscopic origins of shear stress in dense fluid-grain mixtures. *Granular Matter*, 17(3), 297-309.

§2 Le modèle OpenFOAM et le modèle Telemac simulent-ils le substrat de la même manière ? Est-il plus aisé dans OpenFOAM de prendre en compte la granulométrie, la compacité ou la teneur en eau des sols ?

Ni OpenFoam ni Telemac ne simulent le substrat en tant que tel. C'est pourquoi la piste de développement proposée – qui consiste à modéliser le substrat en DEM-PFV et l'écoulement libre par CFD OpenFoam – nous a semblé pertinente et porteuse d'avancées pour l'ingénierie.

§3 Comment expliquer l'origine ou la raison du décalage temporel entre les simulations OpenFOAM et l'expérience ?

La forme exacte du fond, et ses possibles déformations, sont les raisons les plus plausibles, en dehors d'erreurs purement numériques qui peuvent difficilement être totalement exclues.

§4 Le matériau PMMA est-il en similitude sur la perméabilité ?

Seule une réponse qualitative peut être donnée à ce stade. La question est complexe car la réponse varie suivant le mécanisme considéré. Le rapport des vitesses de fluide entre l'écoulement libre et l'écoulement poral peut être conservé dans la mesure où la granulométrie du sédiment est assimilable à celle d'un sable réel et où les deux types d'écoulement sont liés aux mêmes gradients de pression. Les temps de liquéfaction sont en revanche déterminés par le temps caractéristique de consolidation qui varie en H^2/KE (K : perméabilité, E : raideur, H échelle spatiale de la zone liquéfiée). En conditions réelles l'échelle de la liquéfaction (liée à celle de la houle) est supérieure, et la raideur est plus importante (silice vs. PMMA). Une analyse sommaire suggère que les durées de liquéfaction devraient être supérieure en conditions réelles.

Commentaire générale sur les (non-)similitudes et autres biais du modèle physique : dans le contexte d'Hydrofond, les essais en canal ont été conçus pour produire des résultats dans des cas test bien identifiés, permettant de valider la démarche de modélisation. Dans cette optique, les problèmes de similitude avec les situations réelles passent au second plan puisque *in fine* les modèles numériques, plutôt que les expériences, sont supposés rendre compte des conditions réelles - moyennant une définition des paramètres mécaniques représentatifs de l'échelle réelle.

§5 *À quoi servent les essais de l'appareil triaxial ? Comment les résultats (modules d'Young et de cisaillement) sont-ils utilisés ?*

Les mesures triaxiales permettent un choix pertinent des paramètres du modèle granulaire DEM. Dans la mesure où les modules jouent un rôle important sur les temps de liquéfaction (Scholtès et al. 2015) il était important de les déterminer expérimentalement.

§6 *Le livrable 8 (stage de formation aux outils numériques) semble manquer. Y-a-t-il eu des formations assurées ?*

Comme indiqué en p.36, la formation (8h de TP numérique) a été intégrée dans le cadre d'un « workshop » (format école d'été) portant sur les simulations DEM.

§7 *p13 : en ce qui concerne la « mouillabilité » du matériau synthétique, s'agit-il d'une sorte d'hydrophobie du milieu ? Dans ce cas, les tensions de surface solide-air et solide-eau sont certainement assez différentes de celles rencontrées avec des sols. Cela a-t-il eu une influence sur la teneur en air (facilité à « emprisonner » de l'air) ? et au final sur les processus de liquéfaction ?*

La mauvaise mouillabilité n'est pas nécessairement dûe à une hydrophobie, mais quoiqu'il en soit il est possible que le taux d'emprisonnement d'air diffère de celui d'un sable de même granulométrie. S'il est supérieur au taux réel, cela peut effectivement augmenter le potentiel de liquéfaction par les phénomènes de stockage-déstockage, à l'inverse le potentiel de liquéfaction par couplage pression-déformation s'en trouve réduit.

Ce problème n'en a pas vraiment un compte tenu du commentaire général introduit à la suite du point 4.

§8 *p16 : pour ce qui est de la compacité du matériau au cours de l'essai, il est fait état d'une zone intermédiaire où les résistances sont plus faibles (entre 20 et 35 cm). Or les essais pénétrométriques suggèrent une résistance uniforme. Cette incohérence est-elle expliquée par les partenaires ?*

La résistance de pointe dans un matériau homogène augmente de manière monotone avec la profondeur. Le fait qu'elle paraisse uniforme sur un interval particulier indique donc bien une résistance intrinsèque faible sur cet interval.

§9 *p20 et suivantes : une analyse critique sur la forme (sphérique) des grains et l'absence apparente de cohésion mériterait d'être faite.*

La forme des grains est une question récurrente dans le domaine des modèles DEM, dont la discussion nous conduirait bien au delà du sujet. L'expérience montre que la plupart des phénomènes spécifiques aux matériaux granulaires peuvent être reproduits au moins qualitativement avec des formes sphériques. La prise en compte de la forme permet des améliorations quantitatives sur certains points, et peut passer par la modélisation de grains polyhédriques, ou formés d'amas de particules, ou encore par des lois de contact

sophistiquées incorporant des résistances au roulement. Pour une première approche du problème les formes sphériques nous ont paru suffisantes.

§10 *Il subsiste un problème d'ordre et/ou de citation dans le texte pour ce qui concerne les 5 premières figures.*

§11 *p17, 2ème ligne : « fig 12 » plutôt que « fig 10 », puis « figure 13 » au lieu de « figure 11 ».*

§ *p25 et suivantes : des références entre crochets « [3], [4]... » apparaissent dans le texte sans faire l'objet d'une bibliographie.*

§ *p32, revoir l'intitulé de « figures XXX et YYY ».*

Merci pour ces commentaires détaillés. Les citations des figures dans le texte ont été améliorées et correspondent maintenant à l'ordre d'apparition des figures.

Dans la mesure où il n'y a pas de bibliographie propre au rapport synthétique (uniquement la liste des publications issues du projet), il semblait maladroit d'ajouter une liste de référence séparées pour seulement quelques références externes. Les références bibliographiques entre crochets renvoient à l'annexe G. Une note de bas de page explicite à été introduite pour signaler ce renvoi.