

ESSAI DE SIMULATION DE ROULIS EN CENTRIFUGEUSE POUR ETUDIER LA LIQUEFACTION DE MINERAI

CENTRIFUGE ROLLING TEST FOR ORE CARGO LIQUEFACTION

Luc THOREL¹, Fernando SABOYA², Philippe AUDRAIN¹, Alain NEEL¹, Alberto BRETSCHNEIDER¹, Matthieu BLANC¹

¹ IFSTTAR, GERS, Lab. Géomatériaux et Modèles Géotechniques, F-44340 Bouguenais, France

² UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, Brésil

RÉSUMÉ – Afin d'étudier l'effet de roulis sur la cargaison de minerai dans un vraquier lors du transport maritime, un nouveau dispositif expérimental fonctionnant en macrogravité à 80xg est présenté, ainsi qu'un test de réception avec du minerai de fer concentré saturé.

ABSTRACT – In order to study the roll effect on ore cargo in a bulk carrier during shipping, a new experimental device operating at 80xg macrogravity is presented, as well as a reception test with saturated concentrated iron ore.

1. Introduction

Le transport maritime de minerai est la clé économique du succès de l'industrie minière. Le développement de navires de grande capacité pour transporter le volume énorme de minerai a poussé ce secteur à faire face à de grands défis pour un transport maritime sécurisé. Malgré les efforts des autorités en matière de réglementation, plusieurs accidents importants se sont produits : au cours des 12 dernières années, étant responsables de la perte de 71 navires et 225 vies (INTERCARGO, 2016). Parmi ceux-ci, 11 accidents avec 102 pertes humaines sont attribués à un phénomène encore non élucidé lié au comportement particulier du minerai quand il est soumis à une combinaison de chargement spécifique à l'intérieur de la cale.

Des recherches ont évoqué la possibilité que le minerai montre un changement de phase soudain d'un comportement solide (granulaire) à liquide (visqueux). On connaît ce phénomène sous le nom de liquéfaction en géotechnique et il peut avoir lieu quand un matériau granulaire humide est soumis à un chargement cyclique (Wang, 2014). Il est bien connu que certaines caractéristiques du matériau favorisent le risque de liquéfaction pendant le chargement cyclique : la teneur en fines, le taux d'humidité, la densité et la minéralogie étant les causes intrinsèques principales et le chargement imposé, la cause extrinsèque majeure. La bauxite, le fer et le nickel sont parmi les minerais pour lesquels les accidents ont été principalement rapportés.

Pour contribuer à la compréhension d'un tel phénomène, plusieurs études ont été menées impliquant des simulations numériques, l'instrumentation en temps réel et des essais en laboratoire consacrés et la modélisation physique (Spyon et Spadonidis, 2013, Munro et Mohajerani, 2016). Cette dernière approche, malgré toutes les complexités inhérentes, a montré des résultats très prometteurs ayant pour but d'expliquer l'interaction entre la réponse du matériau et le chargement représentatif se produisant à l'intérieur de la cale du vraquier (Thorel et al., 2017).

Les tests sur modèles réduits, tels que le « Rolling test » suggéré par ClassNK (2012), présentent un inconvénient important quant au niveau de contrainte, ce qui est crucial pour une analyse quantitative. Pour surmonter ce problème, on a proposé des tests en centrifugeuse de modèles réduits, adaptés à la configuration du transport maritime de

minéral, à savoir la prise en compte des conditions de similitude pour le champ de contrainte ainsi que celles liées au mouvement imposé par les vagues.

De grands navires comme Panamax, Capesize ou Handymax, selon les conditions météorologiques sont, pendant le voyage, soumis à six mouvements différents : le roulis, le tangage, l'embarquée, le cavalement, le pilonnement et le lacet. Cependant, il est bien connu que le roulis est la composante prédominante, potentiellement responsable de la liquéfaction selon l'IMO (DSC 18/INF.11 2013).

2. Expérimentations en centrifugeuse

La centrifugeuse de l'Ifsttar (figure 1), d'un rayon de 5,5m, est un outil polyvalent dédié à la recherche en géotechnique, qui permet de réaliser des expérimentations sur des modèles réduits d'ouvrages géotechniques (fondations, soutènements, tunnels, remblais, ...). La Macro-gravité générée par la rotation de la centrifugeuse (jusqu'à 200xg), permet de reproduire le champ de contraintes de l'ouvrage en vraie grandeur au sein du modèle réduit, et donc son comportement, en respectant les règles de similitude originellement établies par Edouard Phillips (1869).

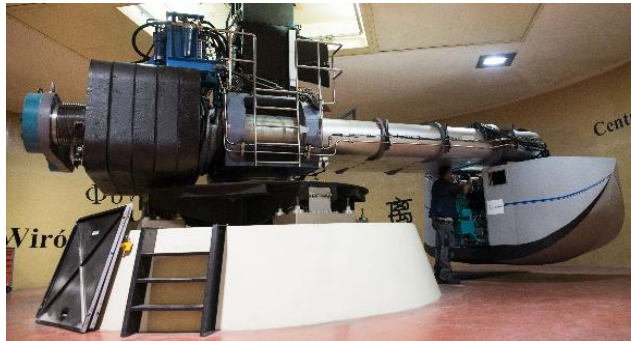


Figure 1. Centrifugeuse géotechnique de l'IFSTTAR

Pour cette problématique de géotechnique hors norme, l'idée est de reproduire un état de contrainte semblable à celui régnant dans le minéral lors des mouvements de roulis générés par le transport maritime dans les vraquiers. Cet essai est inspiré dans sa conception de dispositifs miniatures de roulis conçus pour des expérimentations à 1xg (ClassNK, 2012 ; ISMBC, 2013). L'objectif est d'observer, de comprendre et d'analyser les phénomènes de déformation de la cargaison de minéral soumise à un mouvement de roulis dans un champ de contrainte et de pression réaliste.

Pour simuler le chargement pendant le transport maritime, des données de TSR (Tropical Revolving Storms) qui sont des conditions météorologiques typiques sur les routes maritimes commerciales de minéral, sont utilisées. On s'appuie en particulier sur le paramètre SDA (Significant Double Amplitude) qui est l'amplitude des vagues et leur période rencontrée par le bateau dans de telles routes. On peut s'attendre à un angle de roulis courant de 10°, avec des valeurs maximales jusqu'à 25°.

Pour simuler ces séquences de chargement et les contraintes en résultant au sein de la cargaison à l'intérieur de la cale, un dispositif expérimental original fonctionnant en centrifugeuse a été conçu à l'IFSTTAR pour simuler le roulis (Figure 2a). Celui-ci comprend un conteneur basculant par le truchement d'un berceau tournant, actionné par un vérin hydraulique. La cote de la boîte basculante peut être ajustée avant le test pour simuler différentes configurations de chargement selon le positionnement relatif du centre de gravité et de l'axe de rotation.

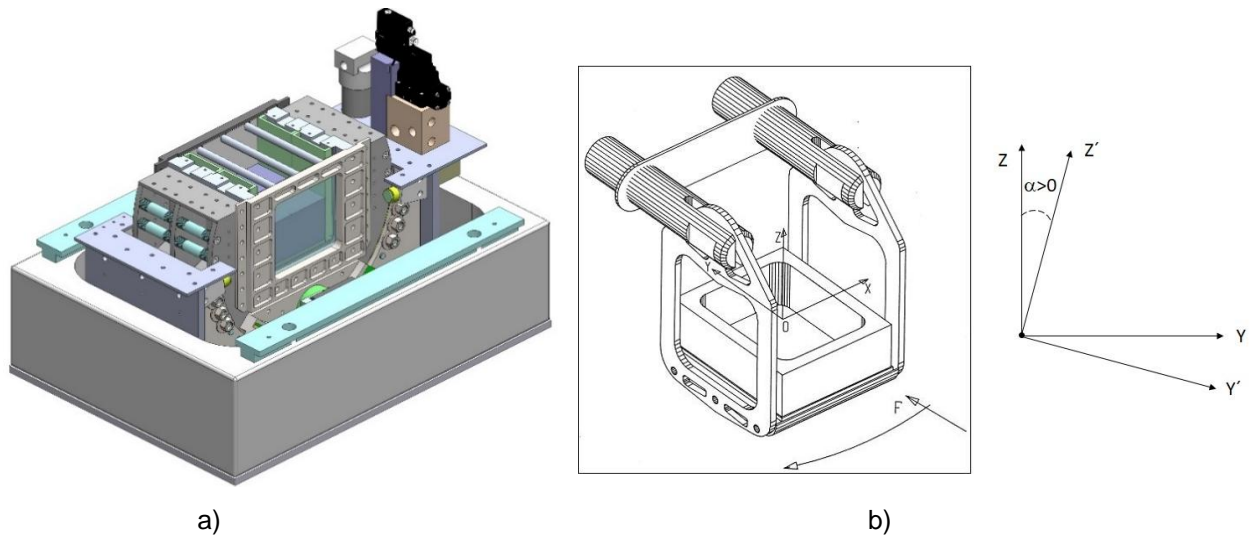


Figure 2. a) Schéma du dispositif d'essai de roulis, b) convention de signe pour l'angle de rotation

Cet équipement permet de simuler la grosse mer SDA, où l'angle de roulis peut varier de $\pm 5^\circ$ à $\pm 25^\circ$ à une fréquence maximale variant de 1,8 à 0,4 Hz, respectivement (Figure 3). Le tableau 1 donne les caractéristiques techniques de ce dispositif. La gamme de fréquence est limitée par les capacités hydrauliques disponibles et ne permet pas de respecter la règle de similitude dans toutes les configurations.

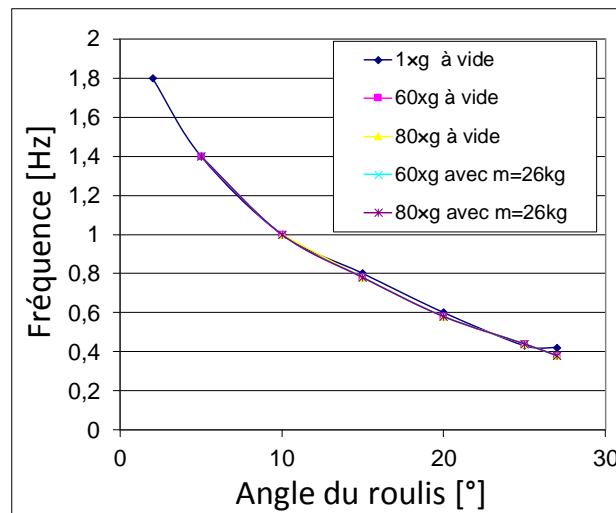


Figure 3. Enveloppe de Performance de l'essai de roulis

Tableau 1. Caractéristiques principales du dispositif

Accélération Max. [xg]	80
Vitesse angulaire (taux de roulis) Max. [°/s]	60
Angle de roulis Maximum [°]	± 25
Masse du conteneur à vide [kg]	140
Masse Max. d'emport dans le conteneur [kg]	40
Masse en mouvement Maximum [kg]	400
Masse à vide total du dispositif [kg]*	1485*

*y compris le conteneur rectangulaire support

3. Tests de réception

Pour tester la capacité du nouveau dispositif à simuler le mouvement réel de la cale d'un navire, un modèle constitué de minerai de fer concentré a été testé à $70\times g$, correspondant à une géométrie réduite à l'échelle 1/70. Ce test avait pour but principal d'identifier la variation des contraintes et des déplacements, causée par une variation angulaire de $\pm 25^\circ$ pendant 4600 cycles. Ceci représente le SDA de la route maritime Australie-Chine sous une tempête tropicale.

Le modèle était instrumenté avec des cellules de contrainte totale (Kyowa BEC-A 200 et 500kPa), des capteurs de pression interstitielle (Measurement and Druck 700 kPa) et LVDT (Figure 4). Le minerai, d'une hauteur de 150mm, est saturé en eau ; son indice des vides est de 0,8 ce qui correspond à une condition lâche pour laquelle un comportement contractant est attendu. Les caractéristiques principales de minerai de fer utilisé dans le modèle sont présentées dans le Tableau 2.

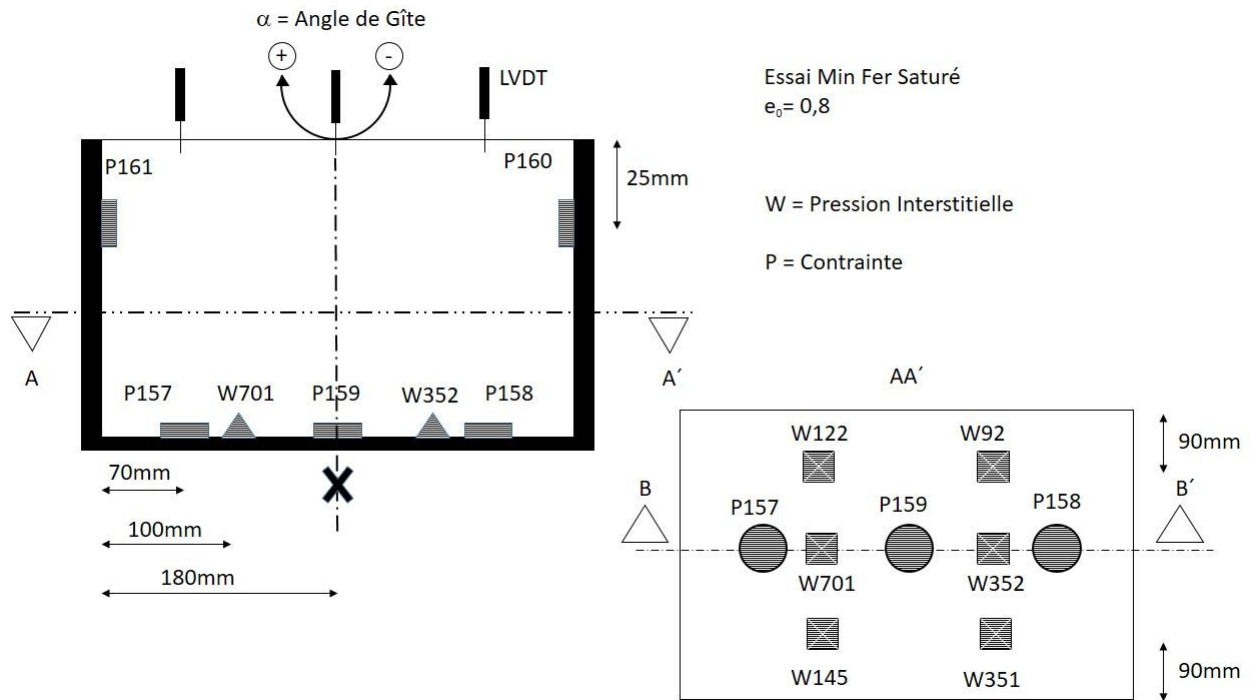


Figure 4. Modèle et instrumentation : vue en élévation (à gauche) et vue de dessus (à droite)

Tableau 2. Propriétés du minerai de fer concentré utilisé dans le modèle

D_{50} (mm)	C_u	e	γ_s (kN/m ³)	γ_h (kN/m ³)	Teneur en fines (%<0.1mm)
0,2	3	0,8	48,6	28,6	15

Le mouvement de roulis du conteneur a été programmé à une fréquence de 0,4 Hz selon un signal sinusoïdal (Figure 5). Cette fréquence permet d'utiliser la capacité du dispositif expérimental de façon optimale pour les plus larges amplitudes.

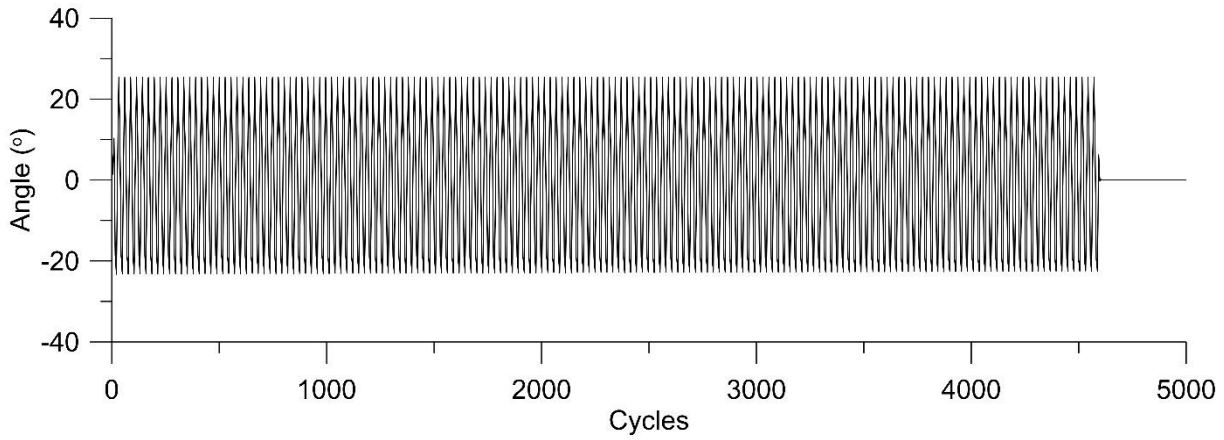


Figure 5. Cycles appliqués au modèle (0,4Hz)

La Figure 6 montre la variation des contraintes verticales au fond du conteneur, au centre (P159) et à mi-distance entre le centre et les murs de la boîte (P157 et P158), ainsi que les variations de pression interstitielle (W351 et W701) au cours des cycles.

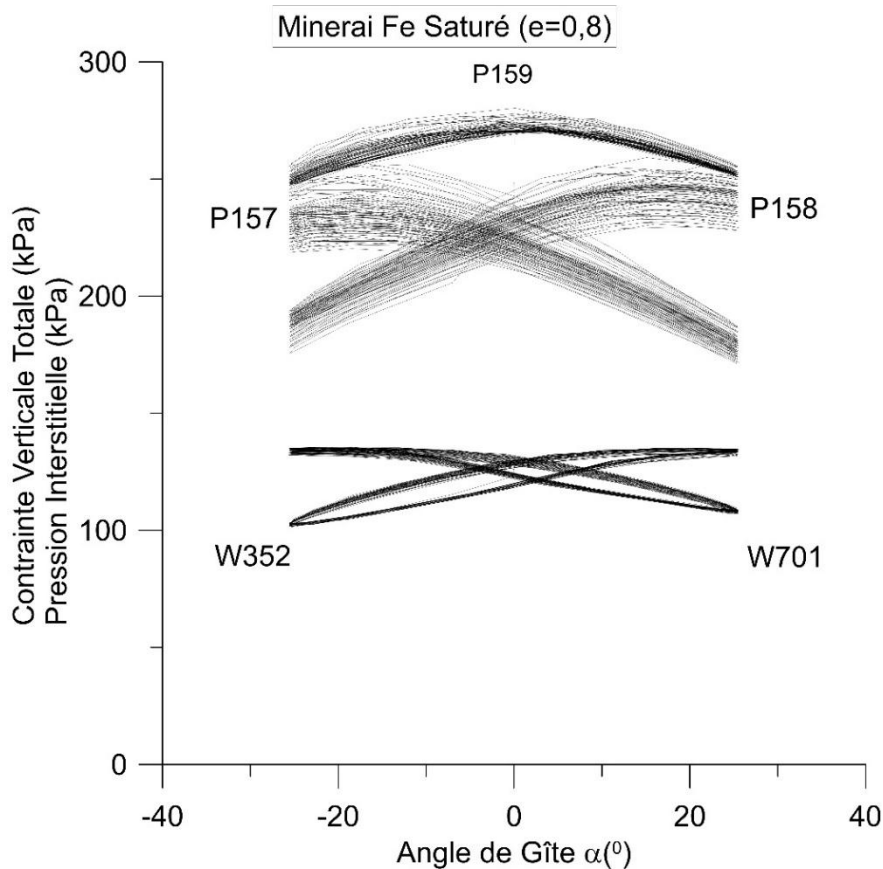


Figure 6. Contrainte totale et pression interstitielle développées pendant le roulis

La variation de la contrainte latérale avec l'inclinaison de la boîte est présentée dans la Figure 7, où l'on peut voir qu'il y a une relation non-linéaire entre l'angle de gîte et les contraintes résultantes. La différence de valeur des contraintes est certainement liée à la position finale du capteur, qui peut s'être déplacé après que la centrifugeuse ait atteint

l'accélération maximale. La variation extrême de contrainte latérale est de 200 kPa enregistrés par P161, pour une inclination de 25° et revenant à de très petites valeurs pendant le renversement du mouvement.

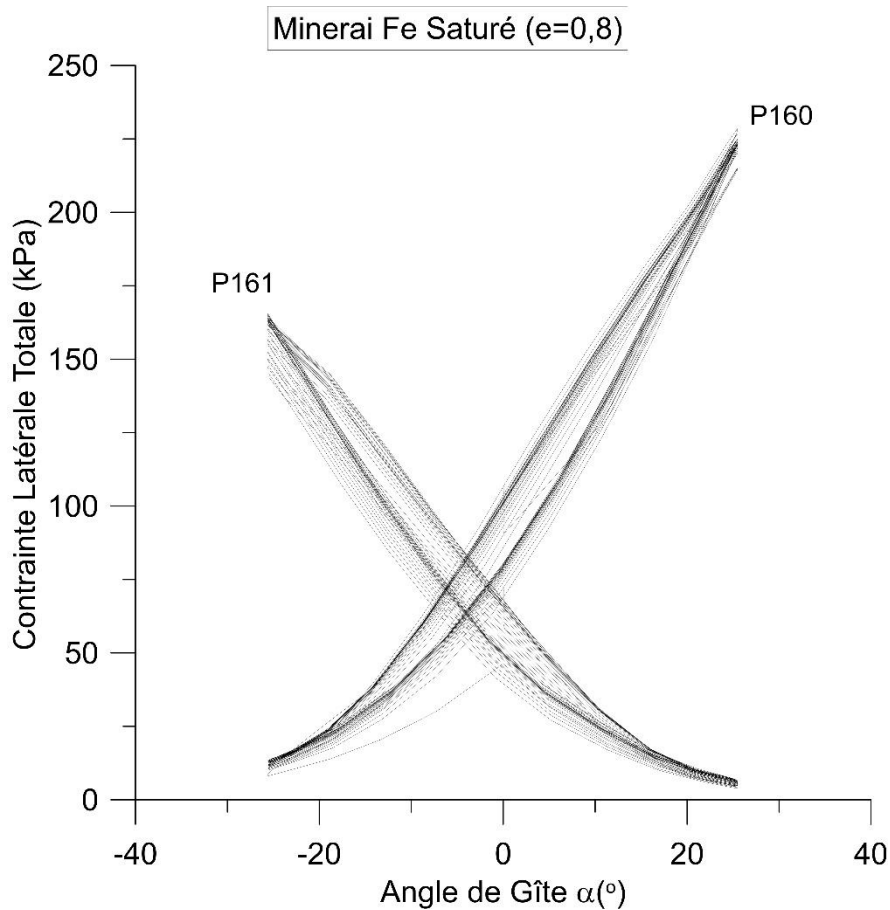


Figure 7. Contrainte latérale totale pendant le chargement cyclique

Concernant le tassement pendant la charge cyclique (Figures 8 et 9), on observe que 50% des tassements totaux se produisent pendant les 20 premiers cycles. Ce matériau peut donc développer une réduction « soudaine » du volume ou un effondrement de sa structure avec l'application des cycles. C'est une caractéristique importante, le changement de volume ayant été observé pour plusieurs types de minerai pendant le transport maritime.

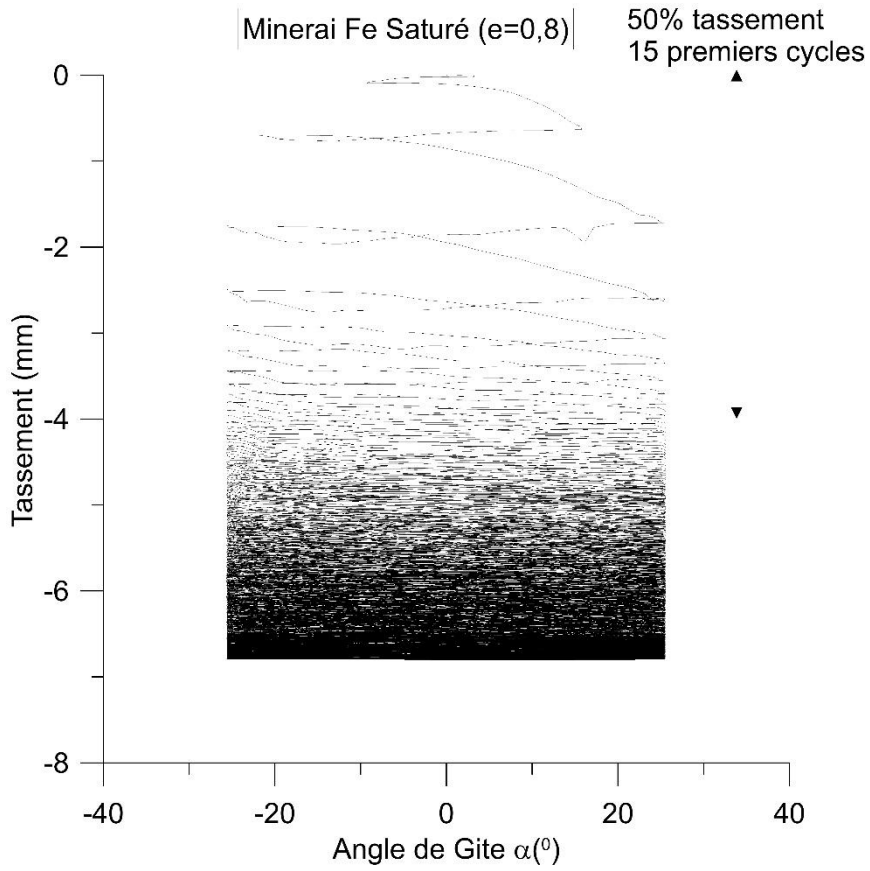


Figure 8. Tassement pendant les roulis

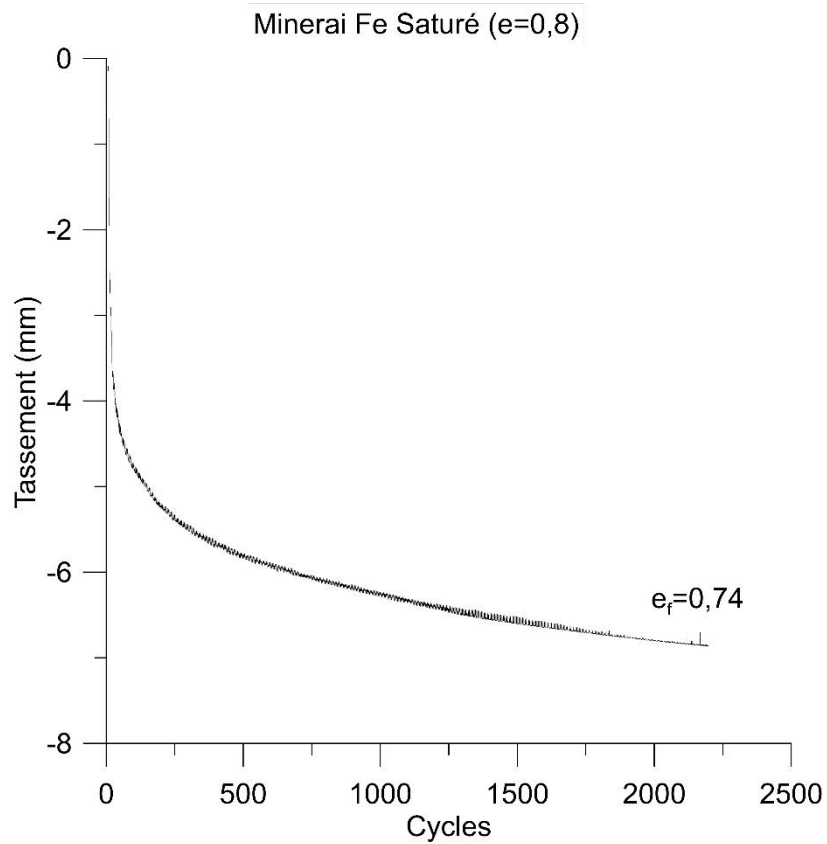


Figure 9. Tassement au cours des cycles

4. Conclusion

Les résultats présentés ici montrent le bon fonctionnement du dispositif, qui permet la modélisation du chemin de chargement se développant à l'intérieur d'une cale d'un vraquier, et son potentiel à révéler la nature des mécanismes principaux qui mènent la cargaison à la liquéfaction.

Grâce au choix techniques dans la conception du dispositif, un nombre presque illimité de cycles peut être appliqué au modèle, simulant ainsi le roulis (jusqu'à 25 degrés) de conditions de mer de routes maritimes commerciales différentes, incluant aussi les tempêtes tropicales.

Pour les prochains essais des géométries différentes sont envisagées (parois lisses ou rugueuses, ...), ainsi que l'utilisation de techniques de traitement d'image pour suivre la déformée de la cargaison au cours des essais, ainsi qu'une amélioration de l'instrumentation (capteurs laser pour le tassement, caméra de haute résolution, ...).

Une étude systématique pourrait porter sur l'identification de la Teneur en eau Limite de Transport (TML en anglais), en particulier sur les minerais de nature latéritique.

5. Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme ERANet MarTec (Maritime Technologies) « LiquefAction » via le Ministère Français en charge de la Transition Ecologique et Solidaire, Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM/SAGS/EP1). Qu'ils soient grandement remerciés.

6. Références

- ClassNK (2012). Guideline for the safe carriage of Nickel Ore. 188p.
- DSC 18/INF.11, (2013). Technical Working Group (TWG) Report #2 Marine Report. International Maritime Organization
- INTERCARGO (2016). Bulk Carrier Casualty Report. London.
- International Maritime Solid Bulk Cargoes Code 2013.
- Munro, M., Mohajerani, A. (2016). Moisture content limits of iron ore fines to prevent liquefaction during transport: review and experimental study. International Journal of Mineral Processing, 148.
- Phillips E. (1869). De L'Equilibre Des Solides Elastiques Semblables. Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de L'Académie Des Sciences, **vol.68**, série 2, pp.75-79.
- Spion J.K., Spadonidis C.C. (2013). Micro-scale modeling of excited granular ship cargos: A numerical approach. Ocean Engineering (74) 22-36
- Thorel L., Audrain Ph., Néel A., Bretschneider A., Blanc M. (2017). Centrifuge Rolling test for Ore Liquefaction Analysis. VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017, pp 1-6, Nantes, France.
- Wang, H. (2014). Evaluation of Liquefaction Potential of Partially Saturated Heap of Iron Ore Fines during Maritime Transportation. 334 p. PhD Thesis, University of Tokyo, Japan.