



Étude de l'interaction sol-structure dans les ouvrages portuaires

Tassadit HERMIME ¹, Smail GABI ²

1. Université de Tizi-Ouzou, Faculté de Génie de construction, L.G.E.A, Université Mouloud Mammeri, P.P N°17 R.P, 15000 Tizi-Ouzou, Algérie.
tassadit.hermime@ummto.dz; smail.gabi@ummto.dz

Résumé :

L'interaction sol-structure est une discipline de la mécanique appliquée s'intéressant au développement et à l'investigation des méthodes théoriques et pratiques pour l'analyse des structures soumises à des charges dynamiques en tenant compte du comportement du sol et de la structure. Le phénomène de l'interaction dynamique sol-structure a été reconnu depuis longtemps comme étant un facteur significatif dans la réponse sismique et dynamique des structures. Nous proposons dans cet article une évaluation de l'effet de la rigidité d'interface, et de l'interaction sol-structure sur le comportement dynamique de la palplanche d'un quai. A cet effet, une modélisation en éléments finis d'une extension du port de Béjaia (Nord Algérie) a été réalisée en utilisant le code de calcul Plaxis 2D.

Mots-clés :

Ouvrage portuaires, Accélérogramme, Plaxis 2D, Interaction sol-structure, Palplanche, Sol, Rigidité d'interface.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

1. Introduction

Le terme *interaction sol-structure* est utilisé aujourd'hui pour caractériser les situations où le comportement d'une structure ne peut pas être évalué de façon précise sans considérer aussi le comportement du sol en contact et de leur interface. C'est un phénomène de la modification de la réponse du sol (de la structure) par la présence de la structure (le sol) car le sol n'est pas parfaitement rigide. Sous l'effet d'un chargement dynamique, le sol et la superstructure vibrent simultanément et interagissent l'un avec l'autre. La vibration de la superstructure entraîne des forces sur la fondation qui sont transmises au sol modifiant sa réponse. La plus grande difficulté d'analyse de l'interaction sol-structure réside dans la prise en compte du sol et de la structure simultanément. (SEGHIR, 2011).

A l'état actuel, le comportement des structures est clairement présenté dans la littérature. Cette dernière illustre des modèles de base qui sont plus performants conduisant à des résultats pertinents. En revanche, les modèles de comportement des sols sont compliqués par leur nature de liaison avec la structure. En effet, la difficulté principale de la modélisation du comportement du sol est liée à la propagation des ondes sismiques traversant les différentes couches du sol. En plus, les sols de fondation sont connus par des propriétés spécifiques, telles que l'hétérogénéité, l'anisotropie et la dominance du non linéarité matérielle. À ce sujet, l'analyse sismique d'une structure tenant compte des propriétés locales du site, diffère de celle considérée encastrée à sa base. De ce fait, il est particulièrement important de considérer l'ISS dans les zones sismiques où la réponse dynamique des sols peut influencer la réponse des structures soumises à l'excitation sismique, (ACHOURI, 2014).

Deux cas peuvent se présenter : Structure incorporée dans les roches (base encastrée), structure incorporée dans le sol (base flexible). Les observations et les analyses post-sismiques ont montré que l'interaction sol-structure joue un rôle primordial dans les dommages sismiques (BOULANGER *et al.*, 1999; KAGAWA, 1980; MIZUNO, 1987). Et Pour résoudre un problème d'interaction sol-structure, plusieurs aspects nécessitent une étude approfondie à savoir : la définition de l'aléa sismique et du mouvement résultant, l'étude du comportement du sol sous chargement cyclique, l'évaluation de la réponse du sol en champ libre et celle des structures sous chargement dynamique.

L'interaction sol-structure est étudiée par plusieurs auteurs, parmi eux on peut citer : - SEZAWA et KANAI, en 1935 qui ont examiné pour la première fois l'influence des effets d'interaction sol-structure sur la réponse structurelle, où ils ont étudié la vibration en décomposition d'une structure due à la dissipation de son énergie dans le sol (SEZAWA & KANAI, 1935). MARTEL en 1940 aux États-Unis et pour la première fois a étudié l'ISS en rapportant des observations de la performance du Hollywood Storage Building lors du tremblement de terre de Long Beach en 1933. (MARTEL, 1940). L'un des premiers qui ont souligné l'importance de considérer l'effet de la rigidité des fondations sur les ondes de tremblement de terre (effet cinématique ISS) en plus de l'effet des forces

d'inertie de la structure sur la déformation du sol (effet d'inertie), KAUSEL et ROESSET en 1974 ont développé une méthode basée sur les éléments finis utilisant la technique d'expansion de Fourier pour déterminer la réponse des fondations axisymétriques et des systèmes sol-structure. Cette étude a montré une bonne concordance entre la réponse prédite d'un modèle tridimensionnel et un modèle de déformation plane équivalent d'une centrale nucléaire construite sur une strate (KAUSEL & ROESSET, 1974).

KHALIL (2009), a effectué une étude paramétrique de l'influence de l'interaction sol-structure sur la fréquence fondamentale des bâtiments sous chargement sismique en construisant un abaque faisant varier les paramètres de base. (KHALIL, 2009)

Dans le cas des écrans rigides libres de se déplacer, pour lesquels il propose des approches théoriques qui négligent la déformabilité de la structure (dont Rankine, Coulomb-Poncelet et Caquot-Kérisel), et les écrans non libres de se déplacer librement ou souples, pour lesquels il propose des méthodes semi-empiriques (Terzaghi et Peck) ou des calculs par éléments finis. KRAMER (1999), présente les effets du phénomène d'interaction sol-structure, et donne différentes méthodes pour prendre en compte l'effet d'ISS dans *Geotechnical Engineering*. KRAMER (1999), CLAUGH et PENZIEN (2000) ont traité le problème d'ISS dans le contexte des structures multi supports, comme les ponts, dans leur travaux "*Dynamics of structures*" (CLOUGH & PENZIEN, 2000).

Selon BUCHI (2013), la prise en compte de l'ISS permet en général de réduire des sollicitations par une dissipation au niveau du sol et par une lecture spectrale plus favorable. Et aussi augmenter la période propre d'oscillation de la structure ce qui dans la plupart des cas diminue la valeur de la réponse sismique avec un amortissement plus important la réponse est également plus faible (BUCHI, 2013). Récemment AWCHAT *et al.*, (2022) ont mis en évidence les effets d'interaction, leur réponse sismique et la procédure générale permettant aux ingénieurs d'intégrer l'impact de la SSI. (AWCHAT *et al.*, 2022). ANAND et SATISH KUMAR (2018) ont résumé les différentes approches et les lignes directrices énoncées dans les principaux codes sismiques en visant à inclure les SSI dans l'analyse des structures, dans le but de sélectionner l'approche appropriée. (ANAND & SATISH KUMAR, 2018)

L'analyse sismique d'une structure portuaire supportée par des palplanches constitue un problème complexe d'interaction sol-structure (ISS). Sous chargement sismique, les palplanches sont soumises à la sollicitation imposée par le sol et aux forces d'inertie transmises par la superstructure (dalle). Pour cette raison, il est préférable de modéliser le comportement de la structure, du sol et du milieu interface d'une manière rigoureuse, en tenant compte de la rigidité d'interface. Cet article étudie le comportement des palplanches sous chargement sismique avec une approche numérique, en tenant compte de la rigidité d'interface et de l'interaction sol-structure. A cet effet, une modélisation fine en éléments finis d'une extension du port de Béjaïa (Nord Algérie) a été réalisée en utilisant le code de calcul Plaxis 2D.

2. Méthodologie

2.1 Modélisation de l'interaction sol-structure

Dans cet article, la modélisation de l'interaction sol-structure s'effectue en utilisant la méthode directe, car elle est simple et peut être facilement implémentée dans les codes de calcul. Cette méthode traite le problème de l'interaction sol-structure dans sa globalité. Les déplacements du sol, de la structure et du milieu interface peuvent être simultanément déduits. La modélisation de l'interaction sol-palplanche est établie en utilisant le code de calcul Plaxis 2D, voir Figure 1.

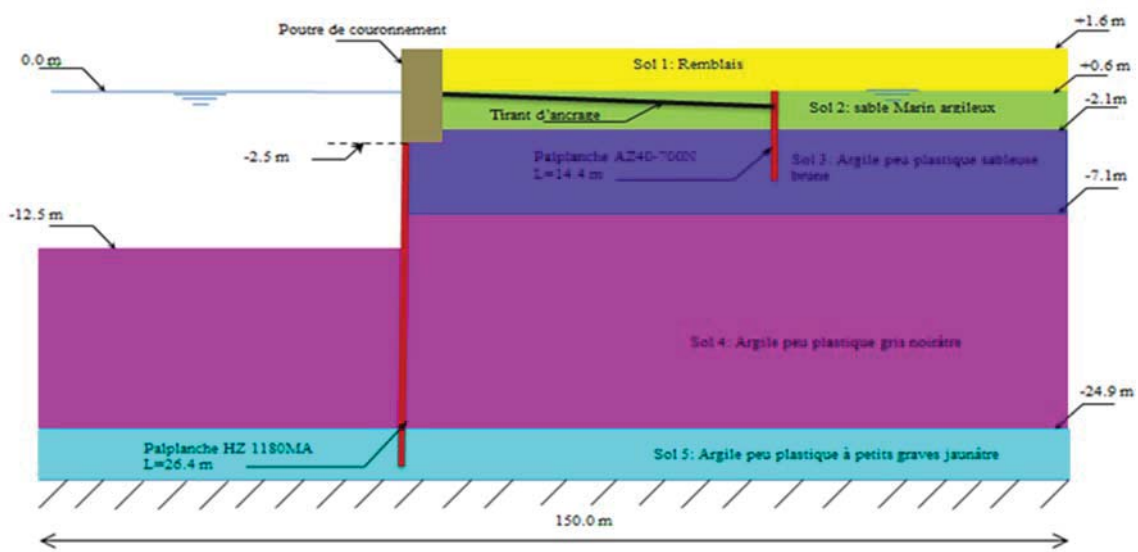


Figure 1. Géométrie du quai dans le modèle (après l'excavation du sol du côté de la mer).

L'analyse est réalisée dans le cadre des déformations planes et le maillage se compose d'éléments triangulaires à 15 nœuds, pour trouver des résultats plus précis qui s'approche de la réalité, le maillage adopté dans ce modèle est de type très fin, voir Figure 2.

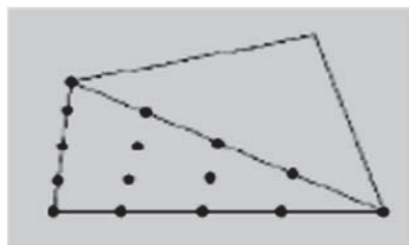


Figure 2. Schéma présentant les éléments à 15 nœuds proposés dans Plaxis.

2.2 Modélisation numérique du système sol-palplanche

La méthode des éléments finis est utilisée depuis longtemps pour étudier le comportement linéaire ou non linéaire des sols. Les solutions dépendent du modèle des éléments de

l'interface sol-palplanche, du modèle rhéologique introduit pour le sol et des conditions imposées sur les éléments de l'interface sol-palplanche. Elle a la capacité de modéliser des interactions sol-palplanche sous des cas de charge quelconques.

2.2.1 Modélisation du sol

Le sol est modélisé par un maillage en éléments triangles à 15 nœuds. L'interpolation est d'ordre quatre, et l'intégration nécessite douze points de contrainte. Ces éléments sont constitués de nœuds qui permettent d'obtenir des résultats en termes de déformations (déplacements, accélérations...) et de points d'intégration de Gauss qui sont définis en termes de contraintes. Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui a produit des résultats en contraintes de haute qualité sur différents problèmes, comme par exemple le calcul de la rupture de sols incompressibles. Le modèle du comportement du sol est le modèle de Mohr-Coulomb bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Ce modèle comporte cinq paramètres : Le module de Young (E), le coefficient de Poisson(ν), la cohésion (C), l'angle de frottement(φ), et l'angle de dilatance(ψ). Toutes les valeurs des paramètres du sol utilisés pour l'analyse sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1. Paramètres du sol utilisés pour l'analyse non linéaire.

<i>Couches de sol</i>	E_s (MPa)	c_s (kN/m ²)	φ_s (degré °)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)
1	36.28	0.804	35.6	21.00	10.0
2	19.5	0	31.3	20.00	16.0
3	18.3	9.792	31.6	15.60	19.6
4	23.9	20.4	27.5	19.54	19.3
5	60.0	24.0	27.6	20.04	17.4

2.2.2 Modélisation de la palplanche

La palplanche est modélisée avec l'élément plaque |. Les plaques sont des éléments de structure utilisés pour modéliser des structures élancées placées dans le sol et ayant une rigidité de flexion et une raideur normale significatives.

La palplanche en éléments finis 2D est composé en éléments poutre avec trois degrés de liberté par nœud : deux translations (U_x , U_y) et une rotation autour de l'axe de la palplanche (Φ_z). L'élément poutre est défini par trois nœuds dans le cas de modélisation du sol en éléments triangle à 6 nœuds, alors qu'il est défini par cinq nœuds dans le cas d'éléments triangle à 15 nœuds, voir Figure 3, (PLAXIS BV, 2010).

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

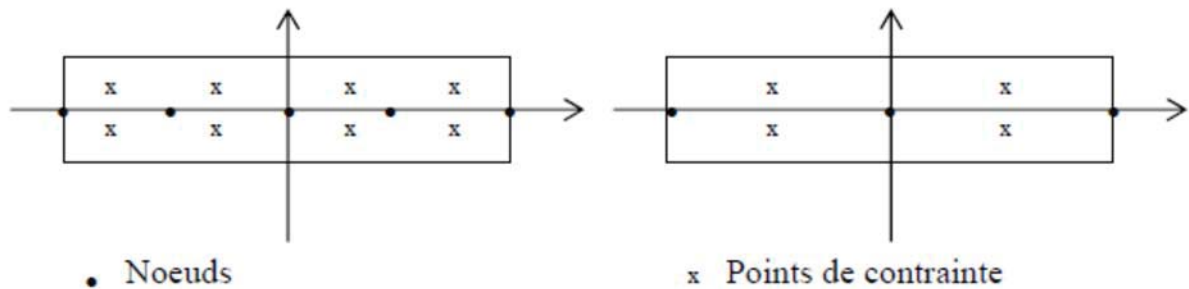


Figure 3. Disposition des nœuds et des points de contrainte dans l'élément de palplanche, (PLAXIS BV, 2010).

La palplanche est une structure élancées placées dans le sol et ayant une rigidité de flexion et une raideur normale significatives. Dans un modèle géométrique, les palplanches sont des représentés dans plaxis en lignes bleues. Le coefficient de Poisson est généralement nul pour les structures relativement flexibles dans la direction perpendiculaire à la Figure 3 comme les palplanches.

2.2.3 Modélisation d'élément d'interface

Le frottement sol-structure est simulé avec un élément d'interface attaché à l'élément de sol. Lorsqu'on utilise des triangles à 15 nœuds, l'élément interface serait défini par 5 paires de nœuds (Figure 4). Chaque interface attribue à une épaisseur virtuelle pour obtenir les propriétés de rigidités de Palplanche. Une "épaisseur virtuelle" est assignée à chaque interface. C'est une dimension fictive utilisée pour définir les caractéristiques du matériau affectées à l'interface R_{inter} imposé égale à $(\tan \delta / \tan \Phi)$, dans le cas rigide c'est-à-dire les interfaces ne sont pas significatives des interactions sol-structure, les propriétés de l'interface, y compris l'angle de dilatance ψ , sont identiques aux propriétés du sol excepté le coefficient de Poisson ν . Dans le cas général, pour des interactions réelles entre le sol et un élément de structure, l'interface est plus faible et plus déformable que la couche de sol associée, ce qui signifie que la valeur de R_{inter} est inférieure à 1. Des valeurs représentatives de R_{inter} dans le cas d'interactions entre différents types de sols et de structures peuvent être trouvées dans la littérature.

Le dimensionnement de la masse de sol dépend des dimensions de la palplanche et de la charge appliquée. Plaxis génère automatiquement (par défaut) les conditions aux limites à la base de la géométrie dans les deux directions x et y ($U_x = 0$, $U_y = 0$). les limites verticales sont placées à distance égale à partir de l'axe de symétrie, et les nœuds sont libres de se déplacer verticalement, mais dans le sens horizontal les déplacements sont nuls ($U_x = 0$).

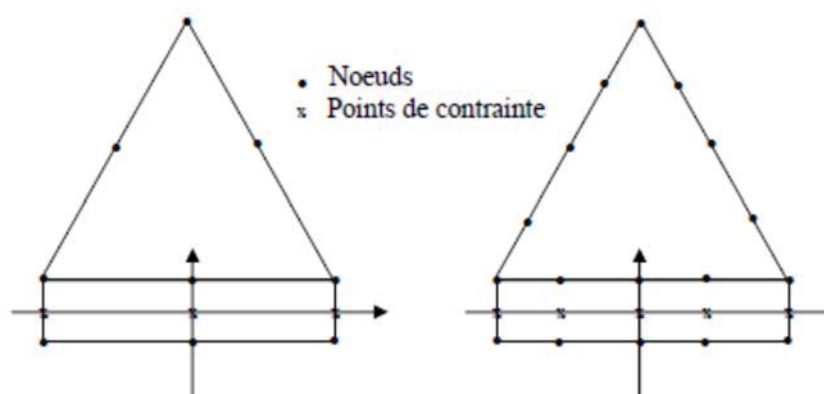


Figure 4. Disposition des nœuds et des points de contrainte dans l'élément interface et leurs connexions avec le sol, (PLAXIS BV, 2010).

2.2.4 Modélisation du tirant d'ancrage

Dans Plaxis il existe deux types d'ancrage un ancrage nœud à nœud ou un ancrage à tête fixe. Dans notre projet le tirant d'ancrage est de type nœud à nœud. C'est un élément élastique. Sa propriété principale est la rigidité axiale EA saisie par ancrage, selon l'unité de force, et non par mètre linéaire. Pour calculer une rigidité équivalente par mètre linéaire, Plaxis demande la saisie de l'espacement dans la direction perpendiculaire à la Figure 4. L'angle est défini dans le sens trigonométrique à partir de la direction des x positifs vers la direction des y.

2.2.5 Poutre de couronnement

Un ouvrage est généralement couronné par une poutre longitudinale. Cette poutre de couronnement assure plusieurs fonctions :

Un élément de rigidification longitudinale de l'ouvrage ou chainage.

Transmettre des efforts au rideau de palplanches.

Elle sert ainsi d'appui pour d'éventuels butons et constituer un élément architectural de l'ouvrage.

Elle est modélisée comme le sol avec un comportement élastique linéaire.

L'excitation sismique utilisée dans cette application est l'enregistrement des 10 premières secondes du séisme de Loma Prieta à la station San Francisco Bay area, (Figure 5).

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

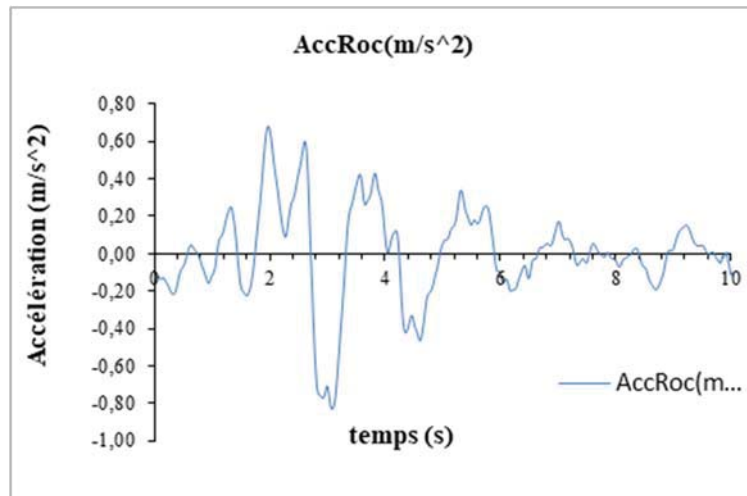


Figure 5. Accélérogramme appliqué à la base du modèle.

3. Résultats et discussion

3.1 Influence de la nature du sol

La simulation numérique du comportement dynamique de l'interaction sol-palplanche est effectuée en utilisant un code de calcul Plaxis 2D développé pour ce cas-là. La Figure 4 montre le déplacement horizontal en fonction du temps pour différents types de sol.

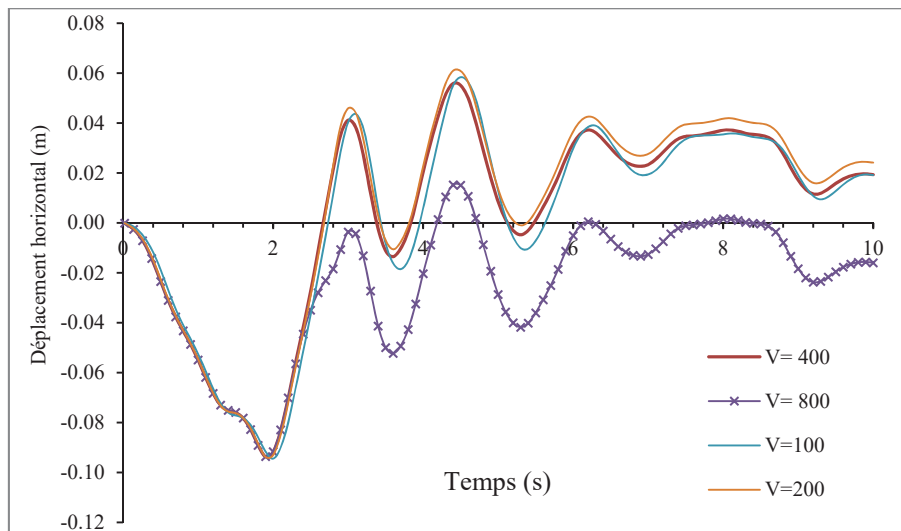


Figure 6. Déplacement horizontal en fonction du temps.

La Figure 6 présente l'influence de la nature du sol caractérisée par la vitesse de la propagation d'onde. Lorsque la vitesse de propagation d'onde de cisaillement est importante, le déplacement horizontal est faible. D'une façon générale, le déplacement dynamique dépend de la nature de sol de fondation.

3.2 Influence de la rigidité d'interface

Le déplacement horizontal maximum du sol en fonction de la nature du sol (rigide et souple), pour voir l'influence de l'interaction, d'une part. Et la rigidité d'interface (sol avec et sa rigidité d'interface) d'autre part est montrée sur la Figure 7.

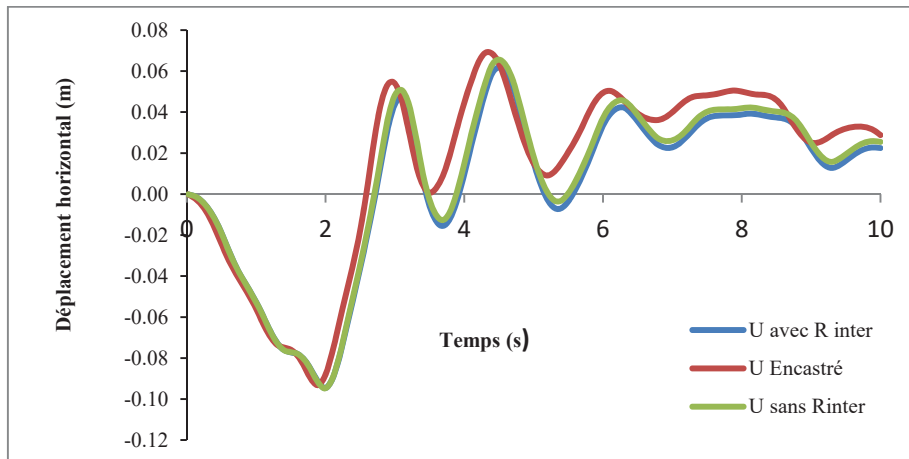


Figure 7. Déplacement horizontal en fonction du temps.

La Figure 8 montre la relation entre la vitesse de propagation et le déplacement relatif avec la rigidité d'interface et sans rigidité d'interface. On ne constate qu'une relation biunivoque non linéaire entre la vitesse de propagation d'onde et le déplacement relatif. On constate aussi que lorsque la vitesse d'onde est assez importante, le déplacement horizontal devient assez faible.

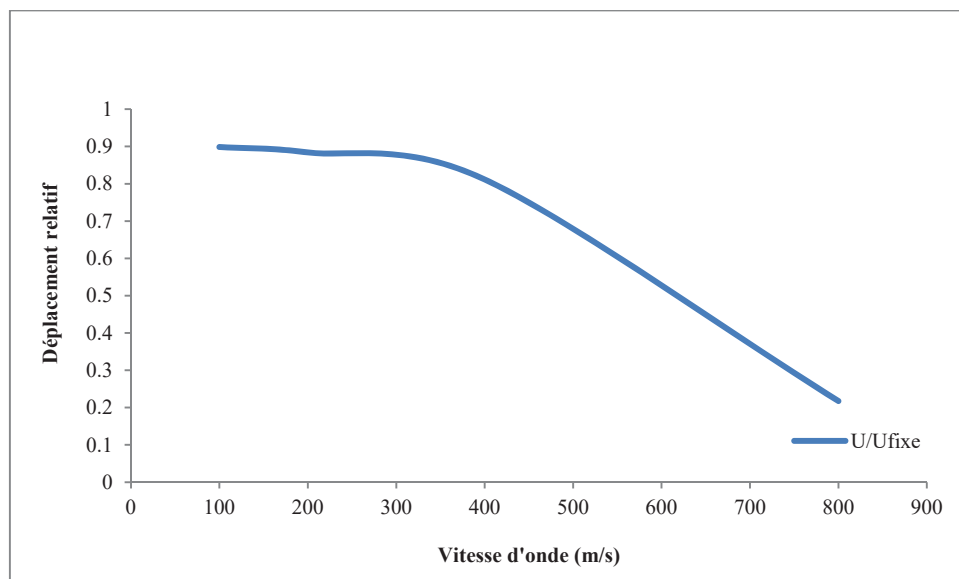


Figure 8. Déplacement relatif en fonction de la vitesse d'onde.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

3.3 Sollicitations internes

Les figures 9 et 10 montrent respectivement le diagramme de l'effort tranchant, et du moment de flexion relatif dans la palplanche en fonction de la vitesse d'onde avec rigidité d'interface et sans rigidité d'interface. Ces figures montrent que lorsque la vitesse d'onde croît l'effort tranchant, et le moment de flexion diminuent dans le cas du système avec rigidité d'interface et augmentent dans le cas sans rigidité d'interface.

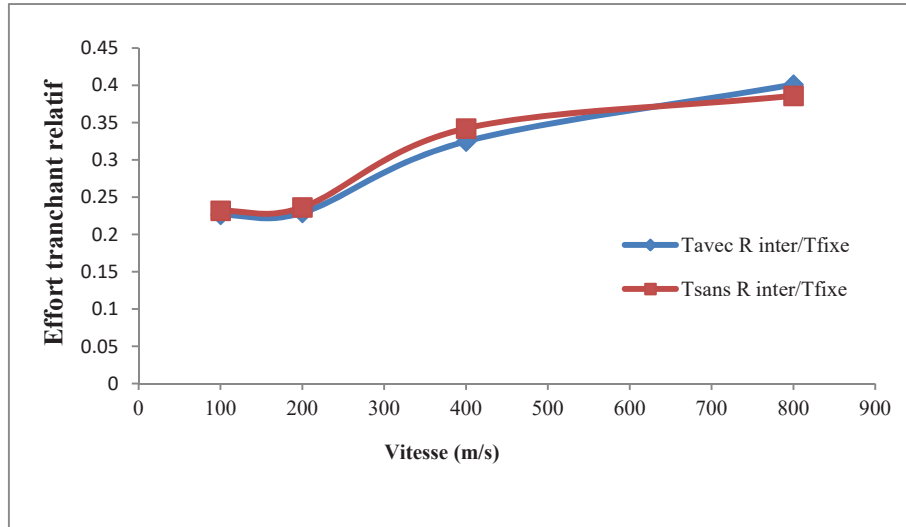


Figure 9. Effort tranchant relative en fonction la vitesse d'onde.

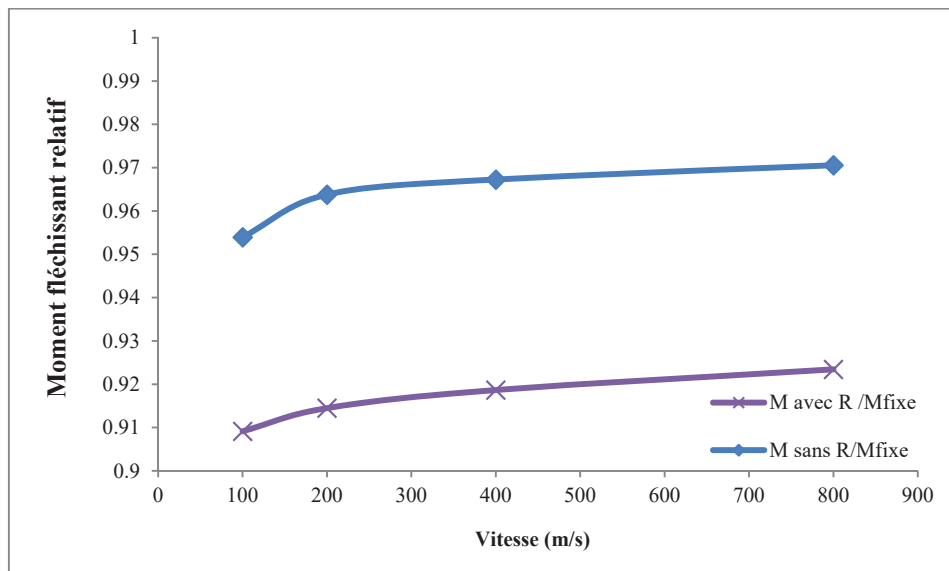


Figure 10. Moment fléchissant relatif en fonction la vitesse d'onde.

4. Conclusions

Cette étude présente la simulation numérique de l'interaction sol-palplanche sur la réponse de palplanche soumise à un séisme dans le cas d'un quai sur palplanches. Les conclusions pouvant être tirées de ce travail sont :

- Les déformations d'une structure au cours d'un séisme sont affectées par trois systèmes liés entre eux : la structure, le sol et la rigidité d'interface;
- La nature du sol décrite par la vitesse de propagation d'onde influe considérablement sur la réponse dynamique des palplanches et sur le milieu interface entre la palplanche et le sol ;
- Le déplacement relatif de la palplanche encastré et de la palplanche à base flexible avec interface et sans interface dépend de la nature du sol de fondation. Il diminue en fonction de l'amélioration des propriétés mécaniques des sols de fondation;
- Les sollicitations internes en fonction de la vitesse de propagation d'onde sont liées à la prise en compte de la rigidité d'interface.
- La réponse de la structure est plus élevée dans les conditions SSI et que le sol mou est plus critique, il est donc important de prendre en compte les effets des SSI pendant le processus de conception

5. Références bibliographiques

- AWCHAT G., MONDE A., SIRSIKAR R., *et al.* (2022). *Soil-structure interaction: comparative review of international codes and other literature with Indian seismic code*. Civil and Environmental Engineering 18:87–95. <https://doi.org/10.2478/cee-2022-0009>
- ACHOURI A. (2014). *Contribution à l'étude de l'interaction et l'isolation dynamique des structures*. Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie.
- ANAND V., SATISH KUMAR S.R., (2018). *Seismic soil-structure interaction: A state-of-the-art review*. Structures. 16:317 326. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.10.009>
- BOULANGER R.W., CURRAS C.J., KUTTER B.L., *et al.* (1999). *Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., 125:750–759. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:9\(750\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:9(750))
- BUCHI E. (2013). *Interaction sol-structure : Calcul des impédances et effets sur les fondations*. Projet de Fin d'Etudes, ENSA Strasbourg, 82p.
- KAGAWA T. (1980). *Soil-pile-structure interaction of offshore structures during an earthquake*. In: Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA.
- KHALIL L. (2009). *Influence de l'interaction sol-structure sur le comportement sismique des bâtiments : analyse dans les domaines linéaire et non linéaire*. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, France.
- MARTEL R.P. (1940). *Effect of foundation on earthquake motion-civil engineering*, ASCE, 10 (1).7-10.
- PLAXIS BV. (2010). *PLAXIS 2D 2010 Material Models Manual*, PLAXIS BV, The Netherlands.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

- SEGHIR A. (2011). *Contribution à la modélisation numérique de la réponse sismique des ouvrages avec interaction sol-structure et interaction fluide-structure : application à l'étude des barrages poids en béton*. Thèse Université Paris-Est; Université Abderrahmane Mira - Bejaïa (Bejaïa, Algérie), <https://theses.hal.science/tel-00627044/document>
- SEZAWA K., KANAI K. (1935). *Seismic waves. Proceedings of the Imperial Academy II*. <https://doi.org/10.2183/pjab1912.11.96>