

# Facteur d'interaction cinématique pour la réponse rotationnelle de fondations superficielles soumises à des ondes de Rayleigh

## Kinematic interaction factors for rotational response of shallow foundations subjected to Rayleigh waves

Tanguy RAMANANTSOAVINA<sup>1\*</sup>, Théodora MAKRYPIDI<sup>1</sup>, Charisis CHATZIGOGOS<sup>1</sup>

*1 Géodynamique & Structure, Montrouge, France*

*\*tanguy.ramanantsoavina@centralesupelec.fr*

**RESUME :** Nous présentons des facteurs d'interaction cinématique pour la réponse rotationnelle des fondations rigides superficielles soumises à des ondes de Rayleigh. Les résultats sont présentés pour des radiers 2D avec et sans enfoncement. Nous considérons un sol homogène et linéaire et un contact parfait à l'interface entre le sol et la fondation. La fondation est soumise à une onde de Rayleigh pure qui se propage à la surface du sol. Nous montrons que la réponse rotationnelle d'une fondation rigide et sans masse dépend de la longueur d'onde de l'onde de Rayleigh, de l'enfoncement relatif et de la dimension caractéristique de la fondation. Globalement, l'interaction cinématique atténue les rotations imposées qui sont induites par l'onde de Rayleigh incidente, et cette atténuation devient plus prononcée pour des fondations plus grandes et plus enfoncées. Les analyses sont menées dans le domaine fréquentiel grâce à la Thin Layer Method (TLM) et sont validées par des calculs complémentaires dans le domaine temporel grâce à la Domain Reduction Method (DRM). Les conclusions principales de cette étude sont : a) il existe une réponse rotationnelle  $y$  compris pour les fondations superficielles à cause des ondes de Rayleigh incidentes et b) l'effet favorable de l'interaction cinématique tend à atténuer les rotations imposées.

**ABSTRACT:** We present kinematic interaction factors for the rotational response of rigid shallow foundations subjected to Rayleigh waves. Results are presented for 2D mat foundations with or without embedment. We consider a linear and homogenous soil profile and perfect contact at the soil-foundation interface. The foundations are subjected to pure Rayleigh waves that propagate along the ground surface. It is shown that the rotational response of a rigid and massless foundation depends on the characteristic wavelength of the Rayleigh wave, the embedment ratio and the characteristic dimension of the foundation. Globally, kinematic interaction attenuates the imposed rotation that is induced by the incidence of the Rayleigh wave and this attenuation effect becomes more pronounced for larger foundations and for foundations with larger embedment. The analyses are performed in the frequency domain using the Thin Layer Method and are validated with complementary calculations performed in the time domain using the Domain Reduction Method. The basic conclusions of the study are: a) the presence of a rotational response component even for superficial foundations because of the incidence of Rayleigh waves and b) the favorable effect of kinematic interaction that tends to attenuate the imposed rotation.

**Mots-clés :** Ondes de Rayleigh, interaction cinématique, fondation superficielle, réponse rotationnelle.

## 1 INTRODUCTION

La conception de grandes structures de génie civil, soumises à des exigences de sûreté importantes, telles que les centrales nucléaires, doivent prendre en compte les effets d'éventuels séismes. En France, la carte de sismicité définie par décret, ainsi que l'Eurocode 8 font office de références pour les calculs parasismiques. Pour la détermination des sollicitations sismiques à appliquer à la structure, l'Eurocode 8 enjoint d'imposer simultanément à la base de la structure des accélérations dans les trois directions de l'espace. Cependant, cette approche ne rend pas compte des mécanismes physiques mis en jeu par

l'interaction entre le sol et la superstructure. De manière générale, la solution du problème d'Interaction Sol-Structure (ISS) est complexe car la nature du sol, l'excitation sismique et la structure  $y$  participent toutes trois et interagissent les unes sur les autres. Au vu de cette complexité, la manière dont est prise en compte l'excitation sismique dans la résolution de ce problème a donc une importance capitale dans la détermination de la réponse (Huang et McCallen, 2025).

De plus, l'approche réglementaire se concentre sur l'influence des ondes de volumes ( $P$  et  $S$ ). Toutefois, lorsque ces ondes de volume atteignent la surface du sol (qui est une surface libre de contraintes) des ondes

de surface, les ondes de Rayleigh et les ondes de Love, sont générées par « capture » des ondes de volume (Semblat et Pecker, 2009). De nombreuses études récentes ont montré l'impact de la prise en compte des ondes de surface dans la détermination de la réponse de la structure, en particulier dans le cas de centrales nucléaires (Abell *et al.*, 2018, Kanellopoulos *et al.*, 2024). Ces études montrent que les ondes de surface induisent des rotations supplémentaires dans la structure, qui n'apparaissent pas lors d'une analyse qui se restreint à l'impact des ondes de volume.

Deux problèmes principaux se distinguent donc lors de la détermination de la réponse d'une structure à une excitation sismique : modéliser adéquatement le problème d'ISS et modéliser l'excitation sismique par un régime d'onde complet qui inclut la participation des ondes de surface.

De manière générale, le problème de l'interaction entre le sol et la structure peut tout de même être décomposé en deux types d'interaction : l'interaction cinématique (*i.e.*, l'influence de la raideur de la structure et de sa fondation sur le régime d'onde incident) et l'interaction inertielle (*i.e.*, l'influence des oscillations de la superstructure sur les efforts ressentis par les fondations). Dans ce cadre, nous mettons à profit le théorème de superposition de Kausel (Kausel et Roësset, 1974) qui énonce que le problème de l'ISS (en linéaire) peut être décomposé en trois sous-problèmes : solution du problème d'interaction cinématique, détermination des impédances dynamiques et calcul de structure. Ainsi, étudier précisément l'interaction cinématique, c'est-à-dire comprendre les phénomènes physiques en jeu et la manière dont ils sont perturbés par divers paramètres, est très intéressant tant du point de vue théorique que du point de vue pratique. Dans ce cadre, nous adoptons ici une approche tout à fait générale, en considérant des structures idéales (*i.e.*, infiniment rigides et sans masse) et des ondes de Rayleigh pures, c'est-à-dire introduites dans le milieu sans réflexion préalable d'une onde de volume sur la surface libre.

Nous cherchons à quantifier précisément l'atténuation par interaction cinématique vis-à-vis de la réponse rotationnelle (mouvement de tangage) d'une fondation superficielle idéale soumise à une onde de Rayleigh. Le mouvement étudié est représenté schématiquement sur la Figure 1.

Pour comprendre les phénomènes mis en jeu, nous menons une étude paramétrique sur la longueur de la fondation, la longueur d'onde de l'onde de Rayleigh et l'enfoncement relatif de la fondation. Nous utilisons la Thin Layer Method (TLM) qui permet d'introduire des ondes de volume (S, P) ou de surface (Rayleigh, Love) dans un milieu stratifié horizontalement, par un calcul dans le domaine fréquentiel (Waas, 1972). Nous

relevons ensuite le déplacement des extrémités de la fondation pour calculer sa rotation selon l'axe de tangage. Nous confrontons ensuite ces résultats à une analyse dans le domaine temporel, menée grâce à la Domain Reduction Method (DRM) (Bielak *et al.*, 2003).

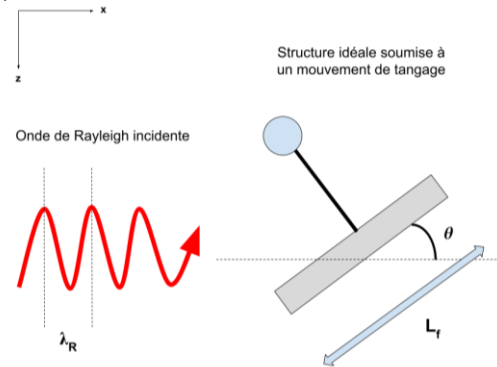


Figure 1 – Schéma du mouvement de tangage étudié

## 2 PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Dans cette partie, nous présentons le cadre de l'étude ainsi que les hypothèses retenues pour traiter le problème de l'atténuation du tangage par interaction cinématique, dans toute sa généralité.

### 2.1 Ondes de Rayleigh

Lors de la rupture d'une faille en profondeur, des ondes sismiques se propagent dans le sol, sous forme d'une onde longitudinale (de compression : onde P) et une onde transversale (de cisaillement : onde S). Ce sont les ondes de volume. Les ondes de compression se propagent à la célérité  $V_P$  tandis que les ondes de cisaillement se propagent à la célérité  $V_S$ .

Lorsque ces ondes parviennent à la surface, elles se réfléchissent mais sont également susceptibles d'être « capturées » sous forme d'ondes de surface. Les deux types principaux d'ondes de surface sont les ondes de Love (onde transversale, dans le plan de la surface libre) et de Rayleigh (onde qui présente à la fois une composante longitudinale et verticale). Dans cette étude, nous nous intéressons uniquement aux ondes de Rayleigh.

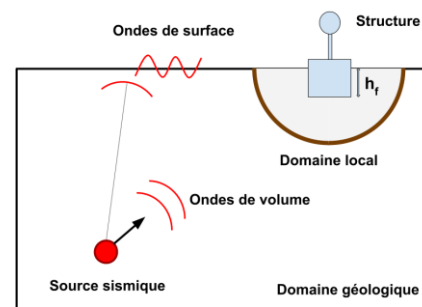


Figure 2 – Propagation des ondes sismiques et problème d'ISS

Un schéma de principe du problème d'interaction sol-structure avec des ondes de surface est fourni sur la Figure 2.

## 2.2 Hypothèses de l'étude

Dans cet article, nous cherchons à quantifier précisément l'atténuation par interaction cinématique du mouvement de tangage induit par une onde de Rayleigh pure dans une fondation superficielle idéale. Nous faisons donc les hypothèses suivantes :

- Le sol est uniforme, linéaire, élastique, isotrope.
- Le modèle est calibré pour représenter un demi-espace infini (voir paragraphe suivant).
- La fondation est infiniment rigide et de masse nulle. En pratique, on fixe le module de Young de la fondation comme un milliard de fois supérieur à celui du sol.
- Le contact entre le sol et la fondation est parfait (ils partagent les mêmes nœuds dans le modèle aux éléments finis).
- L'onde incidente est une onde de Rayleigh pure, générée sans la réflexion préalable d'une onde de volume. Sa forme est celle d'une ondelette de Ricker, représentée sur la Figure 3.
- On ne prend en compte aucun phénomène dissipatif. En outre, le schéma d'intégration numérique n'induit aucune dissipation.

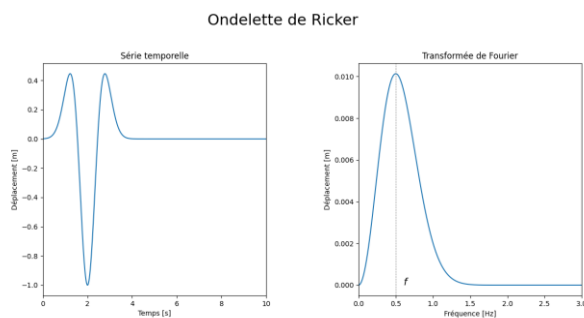


Figure 3 – Représentation d'une ondelette de Ricker dans les domaines temporel et fréquentiel

## 2.3 Paramètres du problème

Les paramètres ayant une influence sur le problème d'ISS considéré sont les suivants :

- La longueur d'onde de l'excitation sismique  $\lambda_R$ .
- La longueur de la structure  $L_f$ .
- La hauteur d'enfoncement de la structure  $h_f$ .
- Les propriétés mécaniques du sol, représentées par le couple célérité des ondes P / célérité des ondes S, noté  $(V_P ; V_S)$ .

Afin que cette étude ait une portée parfaitement générale, nous introduisons les grandeurs adimensionnelles suivantes :

- Le rapport caractéristique  $\lambda_R / L_f$ .
- L'enfoncement relatif  $\eta = h_f / L_f$ . En d'autres termes, lorsque  $\eta = 1$ , la structure enterrée est un carré. Lorsque  $\eta = 0$ , la structure est fondée en surface du sol.

## 2.4 Modélisation du sol comme un demi-espace infini

Pour traiter le problème de l'interaction cinématique avec une onde de Rayleigh dans toute sa généralité, nous cherchons à représenter le sol comme un demi-espace infini.

Dans le cadre de la TLM, cette hypothèse est déjà incluse dans la formulation même de la méthode. Aucune implémentation supplémentaire n'est donc nécessaire.

Dans le cadre d'un calcul FEM, nous menons une modélisation dite « pseudo-2D ». Les éléments du modèle aux éléments finis sont des briques (3D) à huit nœuds, mais le modèle ne fait qu'un élément de profondeur dans la direction hors-plan. De plus, les déformations hors-plan sont bloquées, autrement dit nous travaillons en déformations planes. Enfin, les déplacements aux frontières du modèle sont bloqués par des appuis glissants (sauf à la surface qui est laissée libre).

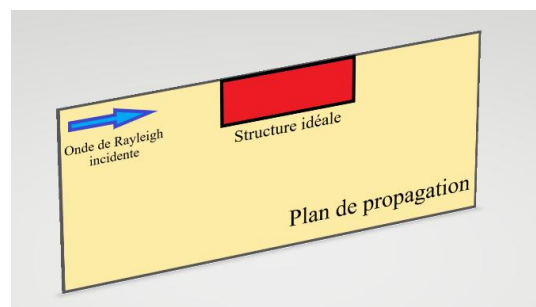


Figure 4 – Plan de propagation de l'onde de Rayleigh

Autrement dit, nous ne modélisons le problème que dans le plan de propagation de l'onde de Rayleigh. Ce problème est représenté sur la Figure 4.

## 2.5 Remarques sur la modélisation de l'excitation sismique par une onde de Rayleigh pure

Dans la réalité, les ondes de Rayleigh sont générées au niveau de la surface libre par la réflexion des ondes de volume. Cependant, dans cet article, nous ne propageons pas d'ondes de volume dans le domaine de

sol au préalable. Nous introduisons directement une onde de Rayleigh pure dans le domaine de sol. Ceci est possible grâce aux méthodes numériques utilisées (voir la section 3).

Nous justifions ce choix par la nécessité, d'un point de vue théorique, de prendre en compte la contribution exclusive des ondes de Rayleigh au mouvement de tangage. En effet, si l'on modélisait la propagation d'ondes de volume en même temps, il faudrait séparer les contributions relatives des deux types d'ondes au mouvement de tangage, après le calcul. Cela n'est pas une tâche aisée *a priori*.

D'un point de vue pratique, cette démarche a un fort intérêt car le profil des ondes de surface est susceptible d'être fortement altéré, lors de leur propagation, par la topographie du terrain. Par exemple, la présence de bassins sédimentaires amplifie les ondes de Rayleigh. Autrement dit, à excitation sismique en profondeur égale et à profil de sol géologique égal, le profil des ondes de surface peut varier en fonction de la topographie. Il est donc primordial de comprendre les effets des ondes de surface sur les structures, indépendamment de la composante volumique qui pourrait les avoir générées.

## 2.6 Définition du facteur d'interaction cinématique

Afin de quantifier l'atténuation du mouvement de tangage par interaction cinématique, nous introduisons la définition des « facteurs d'interaction cinématique ». Ils sont définis comme le rapport de la rotation de la structure par la rotation du sol en champ libre, au point qui correspondrait au centre de la structure. Formellement, nous pouvons écrire :

$$\kappa_{cin} = \frac{\theta_{ISS,cin}}{\theta_{libre}} \quad (1)$$

où  $\kappa_{cin}$  est le facteur d'interaction cinématique,  $\theta_{ISS,cin}$  la rotation de la structure et  $\theta_{libre}$  la rotation du sol en champ libre.

Si le facteur d'interaction cinématique est proche de 1, l'atténuation est très faible et une majeure partie de l'excitation sismique est transmise à la structure sous forme de mouvement de tangage. Inversement, si le facteur d'interaction est proche de 0, l'atténuation est très forte et le mouvement de tangage est faible relativement à l'amplitude de l'excitation sismique.

## 3 MÉTHODOLOGIE ET MÉTHODES NUMÉRIQUES

Dans cette partie, nous présentons les différentes méthodes numériques utilisées, ainsi que la méthodologie implémentée.

### 3.1 Thin Layer Method (TLM)

La Thin Layer Method a été développée, entre autres, par (Lysmer, 1970) et (Waas, 1972). Elle permet de déterminer la réponse de site d'un sol élastique linéaire stratifié horizontalement. Cette méthode traite chaque type d'onde séparément, à partir de leurs équations théoriques et d'une discrétisation verticale du sol. Pour la modélisation des ondes de surface, il n'est donc pas nécessaire de générer au préalable une onde de volume qui viendrait se réfléchir sur la surface libre.

Mathématiquement, elle consiste en la résolution d'un problème aux valeurs propres dans le domaine fréquentiel. Pour les ondes de Rayleigh, ce problème se formule ainsi :

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}k^2 + \mathbf{B}k + \mathbf{G} - \omega^2\mathbf{M} \quad (2)$$

où  $\mathbf{K}$  est la matrice de raideur globale, les matrices  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{G}$  et  $\mathbf{M}$  dépendent des propriétés du domaine de sol,  $k$  est le nombre d'onde et  $\omega$  est la pulsation.

Combinée avec les transformées de Fourier (TF), cette méthode nous paraît très avantageuse car elle permet de :

- Considérer chaque type d'onde indépendamment les uns des autres.
- Mener le calcul de réponse de site très rapidement (car la discrétisation n'est que verticale) et une fois pour toute (si l'on conserve le même profil de sol).
- Injecter dans le modèle une grande variété de signaux sismiques, grâce à une convolution avec un signal de référence.

Cette méthode est la base du logiciel de calcul SASSI (Deng et Ostadan, 2019), que nous avons utilisé dans le cadre de cette étude.

### 3.2 Domain Reduction Method (DRM)

La Domain Reduction Method a été développée par (Bielak *et al.*, 2003). Elle permet de décomposer l'analyse sismique d'un site d'intérêt (par exemple un bassin sédimentaire) en deux étapes : un calcul à l'échelle géologique (domaine de plusieurs kilomètres de large) puis un calcul à l'échelle géotechnique (domaine de quelques centaines de mètres de large). Cette méthode permet d'utiliser un maillage plus large pour le premier calcul puis de le raffiner pour le deuxième calcul afin de capturer les particularités locales du site d'intérêt.

Le mouvement sismique calculé à l'échelle géologique est introduit au niveau d'un contour qui encercle le domaine local (l'arc de cercle brun sur la Figure 2), par le biais d'efforts nodaux effectifs :

$$\mathbf{P}^{eff} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i^{eff} \\ \mathbf{P}_b^{eff} \\ \mathbf{P}_e^{eff} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_{be}^{\Omega^+} \ddot{\mathbf{u}}_e^0 - \mathbf{K}_{be}^{\Omega^+} \mathbf{u}_e^0 \\ \mathbf{M}_{eb}^{\Omega^+} \ddot{\mathbf{u}}_b^0 - \mathbf{K}_{eb}^{\Omega^+} \mathbf{u}_b^0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

où  $\mathbf{M}$  et  $\mathbf{K}$  représentent respectivement les matrices de masse et de raideur croisées,  $\mathbf{u}$  est le champ de déplacement et les indices  $i$ ,  $b$  et  $e$  font référence respectivement à l'intérieur du domaine local, à la partie de la couche DRM en contact avec le domaine local et à la partie de la couche DRM en contact avec le reste du modèle ( $\Omega^+$ ).

Lorsque nous effectuerons le couplage entre le calcul fréquentiel et le calcul temporel, nous utiliserons cette méthode pour injecter la réponse de site calculée avec la TLM dans un modèle aux éléments finis. La réponse dans le domaine temporel est déterminée grâce au code de calcul Real-ESSI.

### 3.3 Calcul de la réponse de la structure en rotation

Étant donné que la fondation est infiniment rigide, on peut calculer sa rotation autour de l'axe hors-plan grâce au déplacement de ses extrémités. Nous calculons donc l'amplitude du mouvement de rotation à l'aide de la formule suivante :

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{u_{z,g} - u_{z,d}}{L_f - u_{x,g} + u_{x,d}} \right) \quad (4)$$

où  $u_{i,j}$  est le déplacement maximal dans la direction  $i$  de l'extrémité  $j$  ( $g$  pour gauche et  $d$  pour droite).

La rotation en champ libre est mesurée dans un modèle identique à ceci près que la fondation est absente et a éventuellement été remplacée par un bloc de sol. On mesure la rotation à l'endroit où aurait été le centre de la fondation. Pour un calcul TLM uniquement, on applique la formule (4) à deux points très proches. Pour un calcul TLM + FEM, on applique la formule (4) à deux nœuds d'un élément fini. Ceci ne fournit qu'une valeur approchée de la rotation exacte car le sol n'est pas rigide mais cette approximation est satisfaisante car la longueur d'onde est grande devant la distance entre les deux points où sont mesurés les déplacements.

### 3.4 Méthodologie de l'étude paramétrique

Pour mener l'étude paramétrique, nous faisons varier la fréquence centrale de l'ondelette de Ricker à caractéristiques de la fondation fixées. Nous menons ensuite deux études paramétriques différentes. L'une consiste à répéter les calculs ci-dessus pour plusieurs longueurs de fondation avec une hauteur enfoncée nulle. L'autre consiste à répéter le calcul pour plusieurs enfoncements relatifs. Pour chaque étude

paramétrique, nous superposons ensuite les résultats dans un graphique qui a pour abscisse le rapport caractéristique  $\lambda_R/L_f$  et en ordonnée le facteur d'interaction cinématique  $\kappa_{cin}$ . Les plages de variation des paramètres sont données dans la section 4.

### 3.5 Couplage entre les deux méthodes

Pour mener des calculs linéaires dans le domaine fréquentiel, l'utilisation de la TLM et du logiciel SASSI est suffisante. Cependant, dans le cas général, où l'on souhaiterait par exemple prendre en compte les non-linéarités du problème (telles que le comportement plastique du sol ou le décollement du radier), il est nécessaire de mener une analyse aux éléments finis (FEM + DRM). Pour combiner les avantages des deux méthodes TLM et DRM, respectivement la rapidité du calcul de la réponse de site pour l'une et la prise en compte des non-linéarités dans l'analyse pour l'autre, on peut implémenter un couplage faible entre ces deux méthodes. La réponse de site est déterminée dans le domaine fréquentiel tandis que le problème d'ISS est résolu dans le domaine temporel.

Concrètement, lors du calcul de la réponse de site, nous introduisons des nœuds d'interaction dans SASSI aux lieux des nœuds de la couche DRM dans le modèle FEM. Après une TF inverse, nous récupérons l'historique temporel de la réponse de site à ces nœuds que nous pouvons ensuite injecter dans le modèle FEM grâce à la DRM.

### 3.6 Couches absorbantes pour l'analyse FEM+DRM

Étant donné que les déplacements aux extrémités du modèle sont bloqués, des réflexions parasites peuvent avoir lieu à ces bords, revenir dans le modèle et interférer avec le mouvement injecté. Pour pallier ce problème, nous plaçons trois couches absorbantes tout autour du domaine de sol. Ces couches ont un fort amortissement. Celui-ci varie entre les couches et est plus fort pour les couches les plus éloignées du domaine de sol.

L'amortissement est implémenté grâce à la formule de Rayleigh. Nous utilisons les trois facteurs d'intensité successifs : 0,3 ; 0,6 ; 1. Ces facteurs s'appliquent aux coefficients multiplicatifs des matrices de raideur et de masse dans la définition de la matrice d'amortissement. Une étude de sensibilité sur ces paramètres a montré que ces valeurs donnaient des résultats satisfaisants, c'est-à-dire qu'aucune réflexion parasite ne revenait dans le modèle.

Finalement, une vue du modèle complet est donnée sur la Figure 5.

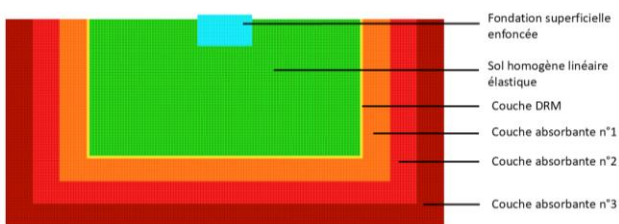


Figure 5 – Vue du modèle numérique

Cette méthode est préconisée lors de calcul avec le logiciel Real-ESSI, ainsi que l'expliquent (Wang *et al.*, 2021).

## 4 ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

Dans cette partie, nous donnons de manière concise les valeurs numériques – ou bien les intervalles de variation – des différents paramètres du problème.

### 4.1 Caractéristiques mécaniques du demi-espace

Afin que la longueur d'onde soit suffisamment grande, nous considérons un sol assez mou. La célérité des ondes P vaut 500m/s et la célérité des ondes S, 250m/s. La masse volumique du sol est fixée à 2100 kg/m<sup>3</sup>.

### 4.2 Caractéristiques de l'onde incidente

L'onde incidente est une onde de Rayleigh pure introduite sous la forme d'un Ricker (voir Figure 3). L'étude paramétrique porte sur la fréquence centrale du Ricker qui varie entre 0,5Hz et 2,5Hz par pas de 0,1Hz. La longueur d'onde  $\lambda_R$  varie donc entre 89m et 460m. La date du pic est  $t_0 = 2s$ . L'amplitude vaut 5cm.

### 4.3 Caractéristiques de la structure

La longueur de la structure  $L_f$  varie entre 35m et 125m par pas compris entre 15m et 25m. Le rapport  $\lambda_R/L_f$  varie entre 1 et 13 environ.

En ce qui concerne l'enfoncement de la structure, le paramètre qui permet de tracer les courbes de réponse est l'enfoncement relatif  $\eta$ . Ainsi, nous faisons varier l'enfoncement relatif parmi les valeurs suivantes : [0 ; 0,25 ; 0,33 ; 0,5 ; 0,75 ; 1].

Les valeurs importantes utilisées servent à montrer la pertinence du rapport  $\lambda_R/L_f$  et de l'enfoncement relatif pour décrire le problème d'un point de vue théorique.

## 5 RÉPONSE D'UNE FONDATION RIGIDE ET SANS MASSE

Dans cette partie, nous présentons les résultats de l'étude paramétrique menée.

### 5.1 Réponse des radiers superficiels sans enfoncement

La réponse en rotation pour un radier superficiel idéal sans enfoncement est fournie dans la Figure 6.

Même pour cette configuration simple, il n'existe pas à notre connaissance de solution analytique pour l'ensemble du problème d'ISS. En effet, l'absence de symétrie rend difficile la résolution du problème d'un point de vue uniquement théorique.

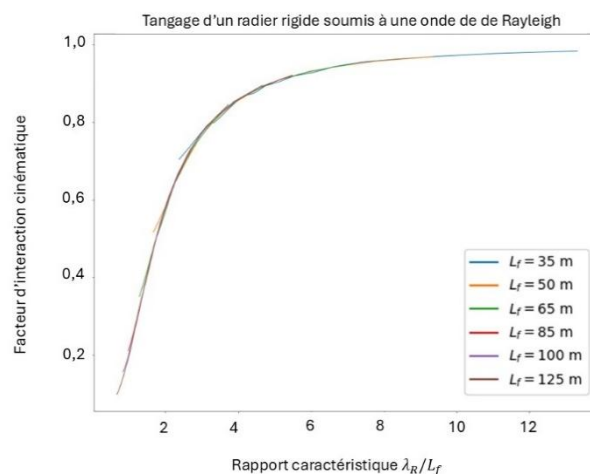


Figure 6 – Réponse d'un radier superficiel à une onde de Rayleigh pure

### 5.2 Réponse des bâtiments ou fondations enterrés

La réponse en rotation pour un bâtiment enterré est fournie dans la Figure 7.

### 5.3 Comparaison avec un calcul dans le domaine temporel

Nous comparons les résultats obtenus pour une fondation de longueur  $L_f = 100 m$  entre une analyse menée uniquement dans le domaine fréquentiel (« SASSI ») et une analyse basée sur le couplage décrit au paragraphe 3.5 (« Real-ESSI »). Les résultats sont présentés dans la Figure 8.

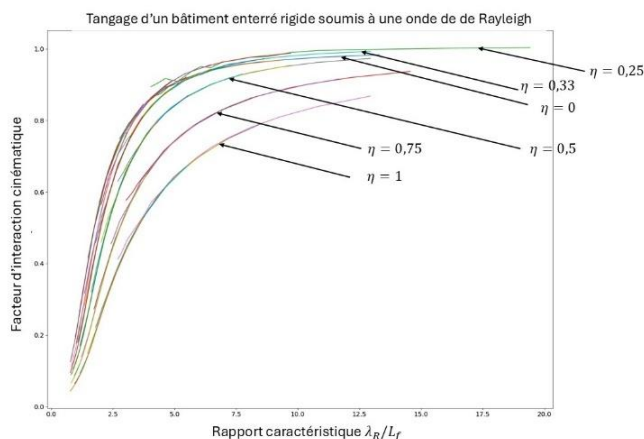


Figure 7 – Réponse d'un bâtiment enterré à une onde de Rayleigh pure

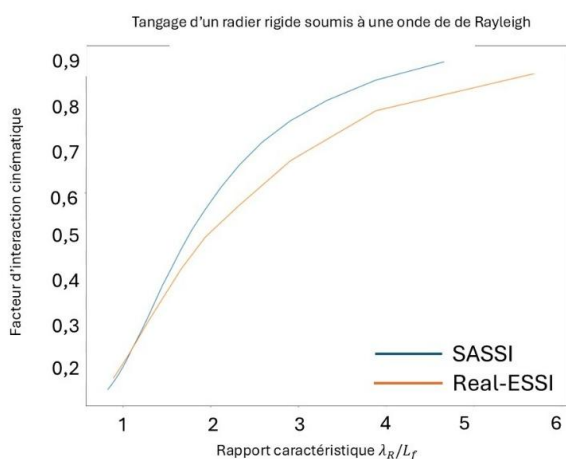


Figure 8 – Comparaison entre les deux approches pour le calcul du mouvement de tangage

Bien que l'écart observé soit compris entre 5 et 10 %, les tendances sont les mêmes, ce qui ne change pas l'interprétation physique et théorique du phénomène étudié.

## 6 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

### 6.1 Interprétation en termes de capacité à suivre le profil de l'onde

Nous pouvons tout d'abord observer que le rapport  $\lambda_R/L_f$ , et non pas la longueur d'onde ou la longueur de la fondation indépendamment l'une de l'autre, gouverne effectivement la réponse de la structure. C'est la signification du fait que les courbes tracées pour différentes valeurs de  $L_f$  se superposent dans les Figures 6 et 7. En ce sens, nous pouvons qualifier ces courbes de réponse de « courbes canoniques ».

Dans le cas d'un radier superficiel non enfoncé infiniment rigide, nous pouvons interpréter l'atténuation du mouvement de tangage par interaction cinématique, d'un point de vue géométrique, comme la capacité de la fondation à suivre la tangente à l'excitation sismique. Plus précisément :

- Quand le rapport  $\lambda_R/L_f$  est inférieur à 2, (*i.e.*, quand la longueur d'onde est courte devant la longueur de la fondation), les rotations imposées sont absorbées par la raideur de la fondation. Ainsi, seules des déformations locales sont susceptibles de se produire.
- Quand le rapport  $\lambda_R/L_f$  est supérieur à 6, (*i.e.*, quand la longueur d'onde est grande devant la longueur de la fondation), le facteur d'interaction cinématique s'approche de 1. Cela signifie que la majeure partie du mouvement de rotation imposé est transmis à la fondation.

Les deux points précédents confirment l'interprétation géométrique que nous proposons.

### 6.2 Effet de l'enfoncement relatif

Tout d'abord, nous devons remarquer que le paramètre qui permet de tracer des courbes de réponse satisfaisantes n'est pas l'enfoncement simple mais l'enfoncement relatif. Ainsi, le paramètre physique qui gouverne l'amplitude du mouvement de tangage n'est pas tant le profil de l'onde de Rayleigh avec la profondeur que la forme de la structure enterrée.

Nous faisons les observations suivantes :

- Lorsque la structure est enterrée, le facteur d'interaction cinématique suit la même tendance que pour les radiers non enfoncés.
- Globalement, lorsque l'enfoncement relatif augmente, les facteurs d'interaction cinématique diminuent. En d'autres termes, plus la structure est enterrée, plus elle atténuera les rotations imposées dues aux ondes de Rayleigh, par interaction cinématique.
- Il semble qu'il y ait un effet de seuil pour l'enfoncement relatif. En effet, lorsque l'enfoncement relatif est inférieur à environ 0,3, les courbes de réponse sont proches les unes des autres. L'intensité de l'atténuation ne semble pas évoluer pour les faibles valeurs d'enfoncement relatif.

Ces observations confirment également l'interprétation géométrique de l'interaction cinématique fournie au paragraphe précédent.

## 7 CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons présenté une méthodologie qui permet d'analyser de manière théorique le problème de l'interaction cinématique de fondations superficielles avec ou sans enfoncement quand elles sont soumises à des ondes de Rayleigh pures.

Grâce à l'étude des réponses à travers le facteur d'interaction cinématique, nous proposons une interprétation géométrique du phénomène d'atténuation de l'excitation sismique imposée par interaction cinématique. L'atténuation est gouvernée par la forme de la structure relativement à la longueur d'onde de l'onde de surface. Ainsi, plus une structure est large et raide, moins elle est susceptible de suivre le profil de l'excitation sismique, et cela pour des raisons purement géométriques et non inertielles.

Grâce au couplage TLM / DRM, cette étude ouvre la voie à la prise en compte de situations plus complexes, en examinant par exemple les impacts de :

- Un régime d'onde plus riche, composé également d'ondes de volume.
- La présence de non-linéarités au niveau de l'interface sol-radier, modélisées par des éléments de contact.
- La présence de non-linéarités dans le sol, à travers sa loi de comportement.
- La stratification du domaine de sol.
- La souplesse de la fondation.

Rappelons que cette analyse est primordiale car elle est une des composantes du problème d'interaction sol-structure complet qui peut être résolu par superposition des résultats des calculs de l'interaction cinématique, des impédances dynamiques et de la structure. Les sollicitations sismiques peuvent être déterminantes pour les grandes installations industrielles. Parvenir à une compréhension fine des mécanismes en jeu dans le problème de l'ISS permet ainsi d'orienter de manière adéquate la conception de ces installations.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée au sein de l'entreprise Géodynamique & Structure dans le cadre du projet de recherche national IM-SURF, financé par l'ANR.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abell JA, Orbović N, McCallen DB, Jeremić B (2018) Earthquake soil-structure interaction of nuclear power plant differences in response to 3-D, 3×1-D, and 1-D excitations, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47 (6), pp. 1478-1495, <https://doi.org/10.1002/eqe.3026>
- Bielak J, Loukakis K, Hisada Y, Yoshimura C (2003) Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, Part I: Theory, *Bulletin of the seismological Society of America*, 93 (2), pp. 817-824, <https://doi.org/10.1785/0120010251>
- Deng N, Ostadan F - A system for analysis of soil-structure interaction. Geotechnical Engineering. Division, Civil Engineering Department, University of California, Berkeley and Bechtel. Power Corporation, San Francisco, May 2019.
- Huang J, McCallen DB (2025) Evaluation of the Impact of Incident Wavefield Modeling on Soil-Structure Interaction of Buildings Using Broadband Physics-Based 3D Earthquake Simulations, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 54 (9), pp. 2339-2362, <https://doi.org/10.1002/eqe.4350>
- Kanellopoulos C, Rangelow P, Jeremić B, Anastasopoulos I, Stojadinović B. (2024) Dynamic structure-soil-structure interaction for nuclear power plants, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 181 (108631), <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108631>
- Kausel E, Roësset JM (1974) "Soil-Structure Interaction Problems for Nuclear Containment Structures," *Proceedings of the ASCE Power Division Specialty Conference*, Boulder, Colorado
- Lysmer J (1970) Lumped mass method for Rayleigh waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60 (1), pp. 89-10, <https://doi.org/10.1785/BSSA0600010089>
- Nguyen KT, Kusanovic DS, Asimaki D (2022) Three-dimensional nonlinear soil-structure interaction for Rayleigh wave incidence in layered soils, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51 (11), pp. 2752-2770, <https://doi.org/10.1002/eqe.3700>
- Real-ESSI-Simulator : Realistic Modeling and Simulation of Earthquakes, and/or Soils, and/or Structures and their Interaction
- Semblat JF, Pecker A (2009). *Waves and vibrations in soils. Earthquakes, traffic, shocks*, IUSS Press, Rome, Italie.
- Waas G (1972) Earth vibration effects and abatement for military facilities: report 3: analysis method for footing vibrations through layered media, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, États-Unis d'Amérique.
- Wang H, Yang H, Feng Y, Jeremić B (2021). Modeling and simulation of earthquake soil structure interaction excited by inclined seismic waves, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146, p. 106720, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106720>