

Dimensionnement sismique des fondations superficielles par une approche en déplacement : application d'un macro-élément d'ISS

Seismic design of shallow foundations using a displacement-based approach: application of an SSI macro-element

Yuxiang SHEN ^{1*}, Jesús PEREZ-HERREROS¹, Fahd CUIRA¹

¹ Terrasol, Paris, France

*yuxiang.shen@setec.com

RESUME : Les méthodes classiques de dimensionnement sismique des fondations, basées sur des approches en force, montrent leurs limites face aux séismes de forte intensité. En effet, la comparaison action-résistance ne permet pas d'évaluer les déplacements induits par le séisme, notamment en présence de mécanismes non-linéaires comme le décollement, le glissement ou la perte de capacité portante. Le chargement sismique étant par nature une sollicitation à déplacement imposé, une approche basée sur les déplacements apparaît plus pertinente. Elle permet ainsi de quantifier les déplacements irréversibles et de les confronter aux critères de performance de l'ouvrage. La mise en œuvre d'une telle approche exige une prise en compte adéquate de l'interaction sol-structure (ISS). Les méthodes numériques directes, bien que précises, sont coûteuses, tandis que les analyses modales classiques ignorent les non-linéarités. L'approche hybride « macro-élément » permet de modéliser efficacement les ISS non linéaires à l'interface sol-fondation avec un coût réduit. Cette étude illustre l'application aux fondations superficielles sous sollicitations sismiques, analysant modes de ruine, torseurs sismiques et taux de décollement pour identifier les cas où l'approche en déplacement élargit la stabilité par rapport à celle en force.

ABSTRACT: Conventional methods for seismic design of foundations, based on force approaches, have limitations when dealing with high-intensity earthquakes. Indeed, the action-resistance comparison does not allow for the evaluation of earthquake-induced displacements, particularly in the presence of non-linear mechanisms such as uplift, sliding or loss of bearing capacity. Since seismic solicitation is inherently imposed-displacement loading, a displacement-based design approach appears more appropriate, as it allows irreversible displacements to be quantified and compared against the performance criteria of the structure. The implementation of such an approach requires adequate consideration of soil-structure interaction (SSI). Direct numerical methods, although accurate, are costly, while conventional modal analyses ignore non-linearities. The hybrid "macro-element" approach effectively models nonlinear ISS at the soil-foundation interface at a reduced cost. This study illustrates its application to shallow foundations under seismic loads, analysing failure modes, seismic efforts and lift-off rates to identify cases in which the displacement-based approach extends the stability domain of the structure compared with the force-based design.

Mots-clés: Interaction dynamique sol-structure ; macro-élément ; approche en déplacement ; séisme ; fondation superficielle

1 INTRODUCTION

La démarche classique de dimensionnement des fondations au séisme, fondée sur des formalismes en force visant à contenir contraintes et efforts sous des valeurs garantissant l'acceptabilité des déformations vis-à-vis de l'ouvrage porté, peut s'avérer limitée en présence de séismes de forte amplitude. En effet, la simple comparaison entre actions et résistances néglige, par construction, les déplacements induits par le séisme ainsi que les effets non-linéaires tels que le décollement, le glissement ou le poinçonnement. Le chargement sismique, étant une sollicitation à déplacement imposé, rend une vérification en

déplacement plus pertinente. C'est d'ailleurs la définition de l'ELU sismique, qui correspond à l'état limite associé à l'apparition de déplacements irréversibles jugés inacceptables. Une approche en déplacement doit donc permettre d'estimer les déplacements irréversibles afin de les confronter aux seuils de performance fixés pour l'ouvrage, complétant ainsi les méthodes traditionnelles basées sur des coefficients de sécurité.

Pour mettre en œuvre un dimensionnement sismique basée sur le déplacement, il est important de prendre en compte l'interaction sol-structure. Les approches directes, qui simulent l'ensemble du système sol-structure dans un même modèle

numérique bien que séduisants, restent toutefois onéreuses en temps de calcul et en ressources numériques. De même, les analyses modales classiques par spectre de réponse, basées sur le principe de superposition, ne peuvent reproduire les mécanismes non-linéaires dominants sous sollicitations sismiques de forte amplitude.

Pour relever ces défis, l'approche dite « macro-élément » a été développée ces dernières années et constitue aujourd'hui une solution prometteuse. De nombreux travaux dans la littérature ont déjà démontré son efficacité pour l'étude des fondations superficielles et profondes, voire fondations sur sol renforcé par

inclusions rigides, (Paolucci et al., 2008, Grange et al., 2008, Abboud, 2017, Pérez-Herreros, 2020, Shen, 2023) en permettant de capturer les mécanismes d'ISS non-linéaires à l'interface sol-fondation tout en maintenant un coût numérique réduit.

Le présent article propose d'illustrer l'application de l'approche par macro-élément aux fondations superficielles soumises à des sollicitations sismiques. Les effets d'ISS dynamique non-linéaire sont analysés sur plusieurs configurations représentatives, et des abaques prêts à l'utilisation sont proposés afin d'évaluer les impacts les plus significatifs.

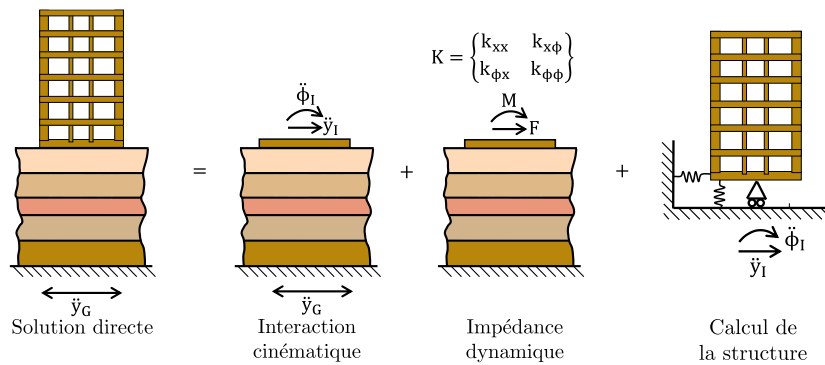


Figure 1. Approche par sous-structuration appliquée à l'étude d'une structure sur fondation superficielle

2 METHODES D'ANALYSE DE L'ISS

2.1 Méthode directe

La méthode la plus directe pour analyser un problème d'ISS consiste à modéliser, dans un même modèle, le sol et la structure à étudier, et à appliquer les sollicitations sismiques aux limites de ce massif. Cette approche, dite méthode directe, permet d'attribuer des lois de comportement non linéaires au sol ainsi que les éventuelles hétérogénéités géotechniques. Elle repose sur la résolution directe des équations de la dynamique du système couplé sol-fondation-superstructure, réalisée en une seule étape.

L'utilisation de ce type d'approche requiert la maîtrise des lois de comportement des matériaux et des interfaces introduites dans le modèle, et nécessite par ailleurs de disposer des informations nécessaires pour calibrer leurs paramètres. La modélisation des limites du massif de sol constitue une difficulté majeure : les ondes sismiques qui atteignent ces limites peuvent être réfléchies et perturber la réponse du modèle. Or, en conditions réelles, une partie de l'énergie du système est dissipée par amortissement radiatif. Cet effet doit donc être correctement représenté à l'aide de frontières absorbantes appliquées aux limites du massif de sol et des bords suffisamment éloignés de la structure pour réduire les effets de bord. Cette question n'est pas sans

impact sur les analyses. En effet, la nécessité de mailler le domaine du sol conduit à augmenter de manière importante la taille du modèle (i.e., un nombre élevé de degrés de liberté), impliquant un coût numérique supplémentaire non négligeable. Il n'est donc pas rare de constater que ce type d'approche n'est utilisé que de manière ponctuelle pour l'étude d'ouvrages exceptionnels, et rarement pour le dimensionnement.

2.2 Méthode par sous-structuration

Lorsqu'un modèle linéaire équivalent peut être utilisé pour approcher le comportement du sol par une loi viscoélastique, la méthode de sous-structures devient applicable. Elle permet de résoudre, sous l'hypothèse de linéarité, le problème d'ISS en plusieurs étapes successives. Un exemple couramment utilisé est le théorème de superposition formulé par Kausel (1978), qui se décompose en trois étapes successives, comme illustré sur la Figure 1 :

- Évaluation de l'interaction cinématique afin de déterminer l'action sismique appliquée à la base de la structure ;
- Calcul des fonctions d'impédance dynamique de la fondation ;
- Détermination de la réponse de la structure en tenant compte à la fois des fonctions d'impédance dynamique et de l'action sismique appliquée à la

base de la structure, obtenues aux deux étapes précédentes.

2.3 Méthode hybride avec macro-élément

Les méthodes faisant appel à des macro-éléments sont des approches hybrides qui tirent parti des avantages des deux méthodes précédentes. Dans ce cadre, un macro-élément est positionné à la base de la fondation afin de modéliser l'ISS linéaire et non-linéaire à la base de la structure.

La partie linéaire du macroélément vise à reproduire la réponse du sol en champ lointain, dont le comportement peut être assimilé à un modèle linéaire équivalent et représenté par des impédances dynamiques.

La partie non-linéaire reproduit les mécanismes non-linéaires susceptibles de se développer en champ proche, incluant ceux à l'interface entre le sol et la fondation ainsi que la plasticité du sol à proximité.

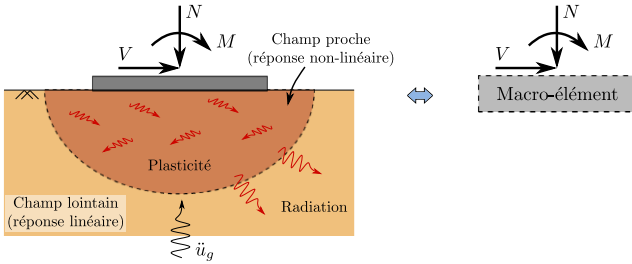


Figure 2. Concept de macro-élément : champ proche et champ lointain

Dans un modèle macro-élément, le comportement de la fondation est représenté au moyen d'une loi constitutive non linéaire, formulée en termes d'efforts généralisés (efforts normaux N , forces horizontales V et moments M) et des déplacements généralisés correspondants (translations et rotations) au centre de la fondation (Paolucci et al., 2008, Grange et al., 2008). La majorité des formulations de macro-élément disponibles dans la littérature s'inscrivent dans le cadre classique de l'élastoplasticité. La modélisation du comportement non linéaire repose alors sur la définition d'une surface de charge, généralement dérivée des courbes d'interaction dans l'espace des efforts (V , H , M).

3 FORMULATION DU MACRO-ELEMENT

Dans le présent travail, un macro-élément formulé dans le cadre classique de l'élasto-plasticité est utilisé.

3.1 Comportement élastique linéaire

Sous un chargement de faible à moyenne amplitude, la fondation superficielle présente un comportement

élastique linéaire, dont la relation entre les forces et les déplacements est décrit par l'équation suivante :

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}^e \cdot \mathbf{U}^e \quad (1)$$

Avec \mathbf{F} le torseur d'efforts appliqué au niveau de la fondation, \mathbf{K}^e la matrice de raideur caractérisant la réponse linéaire de la fondation, et \mathbf{U}^e le vecteur des déplacements élastiques associés.

Sous sollicitation sismique, plusieurs mécanismes de dissipation d'énergie peuvent intervenir, notamment les amortissements matériel et radiatif. Ils peuvent être introduits dans le modèle sous la forme d'un nouveau terme à droite de l'équation précédente, faisant intervenir la matrice d'amortissement \mathbf{C} et le vecteur de vitesses élastiques associées $\dot{\mathbf{U}}^e$.

Les termes des matrices de rigidité et d'amortissement peuvent être calibrés à partir des fondations d'impédance.

3.2 Comportement élastique non-linéaire

Le décollement d'une fondation superficielle constitue un mécanisme réversible qui ne dissipe aucune énergie. Cependant, ce phénomène entraîne une dégradation significative et rapide de la raideur en rotation.

L'expression proposée par Brûlé et Cuira (2018) est retenue dans la formulation du macro-élément d'ISS pour décrire la dégradation de la raideur en rotation et du moment appliqué à la fondation :

$$\frac{K}{K_0} = 1 \quad \text{lorsque} \quad \frac{M}{M_u} \leq \frac{1}{3} \quad (2)$$

$$\frac{K}{K_0} = \frac{27}{4} \frac{M}{M_u} \left(1 - \frac{M}{M_u}\right)^2 \quad \text{lorsque} \quad \frac{M}{M_u} > \frac{1}{3} \quad (3)$$

Avec :

- K la raideur en rotation réduite ;
- K_0 la raideur en rotation initiale ;
- M le moment appliqué ;
- M_u le moment ultime associé au basculement de la fondation (décollement de 100%).

3.3 Comportement plastique

Le comportement plastique est caractérisé par deux critères, chacun représentant un mode de ruine, à savoir le glissement et la perte de capacité portante. Les critères proposés dans le corpus normatif (i.e., EC8) peuvent être directement adaptés comme les surfaces de charge avec une loi d'écoulement non-associée.

La définition d'une loi d'érouissage requiert généralement des paramètres supplémentaires issus des essais expérimentaux. Toutefois, dans un souci de

simplification, aucun phénomène d'érouissage n'est pris en compte dans les analyses présentées ici.

3.3.1 Glissement

L'expression de la surface de charge repose sur le modèle de frottement de Coulomb. Dans le cas des fondations superficielles, l'expression en 2D de la surface de plasticité s'écrit comme suit :

$$f(V, N) = V - N \tan \varphi \quad (4)$$

Où V désigne l'effort horizontal, N l'effort vertical et φ l'angle de frottement.

3.3.2 Perte de capacité portante

L'Eurocode 8 partie 5 propose une expression permettant vérifier la stabilité par rapport à un mécanisme de perte de capacité portante sismique d'une semelle superficielle reposant à la surface d'un sol homogène ; purement frottant ou cohérent. Cette expression intègre la résistance du sol, les caractéristiques du chargement (inclinaison, excentrement) ainsi que les forces d'inertie dans le sol, qui ont pour effet de diminuer la résistance de la fondation. La surface de charge utilisée dans le macro-élément est inspirée par ladite expression et rappelée ci-dessous :

$$f(\bar{N}, \bar{V}, \bar{M}, \bar{F}) = \frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta \bar{V})^{c'_T}}{(\bar{N})^\alpha ((1 - m\bar{F})^{k'} - \bar{N})^b} + \frac{(1 - e\bar{F})^{c'_M} (\beta \bar{V})^{c_M}}{(\bar{N})^\alpha ((1 - m\bar{F})^{k'} - \bar{N})^b} - 1 \quad (5)$$

Avec

$$\bar{N} = \frac{\gamma_{Rd} N_{Ed}}{N_{max}}, \bar{V} = \frac{\gamma_{Rd} V_{Ed}}{N_{max}}, \bar{M} = \frac{\gamma_{Rd} M_{Ed}}{BN_{max}} \quad (6)$$

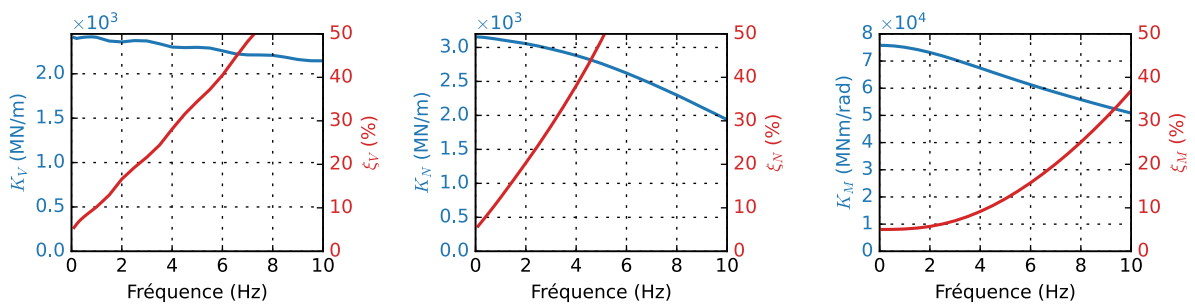


Figure 3. Fonctions d'impédance dynamique de la fondation superficielle objet de cette étude

4.2 Superstructure

La superstructure, modélisée comme un oscillateur simple à masse concentrée placée à une hauteur équivalente h_{eq} , est reliée à la fondation superficielle par un ressort caractérisé par K_{str} .

La fréquence propre horizontale de la superstructure (en base encastrée), notée f_{str} , est fixée à 0.5, 1, 2, 4, 6 Hz. Le taux d'amortissement de la superstructure est pris égal à 5 %. La fréquence propre

Où les paramètres $a, b, c, d, e, f, m, k, k', c_T, c_M, c'_M, \beta, \gamma$ dépendent de la nature frottant ou cohérente du sol de fondation. La grandeur \bar{F} désigne la force d'inertie adimensionnelle du sol. Pour un sol frottant, cette grandeur est donnée par :

$$\bar{F} = \frac{a_g}{g \tan \phi'_d} \quad (7)$$

Le paramètre γ_{Rd} représente le coefficient partiel de modèle, qui est fixé à 1 dans le présent travail.

4 CONFIGURATIONS ETUDIEES

4.1 Sol et fondation

La fondation étudiée est une fondation superficielle, carrée de largeur $B = 10$ m, et installée sur une couche de sol homogène avec pour caractéristiques :

- Masse volumique : $\rho = 2 \text{ t/m}^3$
- Vitesse de propagation des ondes de cisaillement $V_s = 200$ m/s
- Coefficient de poisson dynamique : $\nu_d = 0.4$
- Amortissement matériel du sol : $\xi_{sol} = 5\%$

Les fonctions d'impédance de cette fondation ont été calculées avec un modèle BEM-FEM (Ostadan et Deng, 2011). Elles sont présentées sur la Figure 3, où les termes K_V , K_N et K_M représentent la raideur dynamique de la fondation pour la direction horizontale, verticale et rotationnelle, respectivement, et ceux nommés ξ_V , ξ_N et ξ_M les taux d'amortissement correspondants.

selon la direction verticale est fixée à 10 Hz. Plusieurs rapports d'élanement h_{eq}/B sont considérés : 0.25, 0.5, 1, 2 et 4, en maintenant la largeur de la fondation constante.

4.3 Sollicitation sismique

Un accélérogramme naturel, correspondant au séisme de Parkfield (USA), est utilisé comme chargement (cf. Figure 4). Le pic d'accélération maximal a été ajusté pour correspondre à une accélération de 0.3g. La

phase forte a une durée d'environ 13 secondes. Le spectre de réponse sismique calculé pour plusieurs taux d'amortissement est présenté sur la Figure 5.

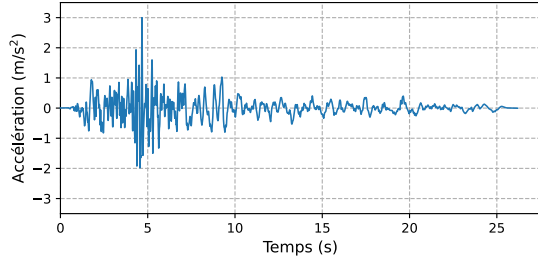


Figure 4. Accélérogramme du séisme Parkfield (mis à l'échelle à 0.3g)

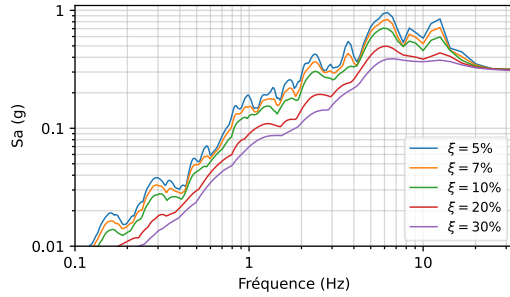


Figure 5. Spectre de réponse à plusieurs amortissements

4.4 Modélisation de l'ISS

Trois types de modélisations de l'ISS à la base de la structure sont considérés, comme illustré sur la Figure 6. Le premier correspond au modèle en base fixe, où tous les degrés de liberté à la base de la structure sont directement bloqués. Dans le second, une approche classique d'ISS linéaire est utilisée, introduisant la rigidité du système fondation-sol dans le modèle au moyen d'une matrice de rigidité élastique et d'une matrice d'amortissement, calibrées à partir des fonctions d'impédance dynamique préétablies. Enfin, le modèle non-linéaire d'ISS est introduit grâce à un macro-élément d'ISS non-linéaire (Terrasol, 2020).

La réponse sismique du modèle en base encastrée est facile à estimer à partir du spectre de réponse, en considérant la fréquence propre f_{str} de la superstructure et son taux d'amortissement ξ_{str} . La réponse du deuxième modèle peut être calculée à partir d'un oscillateur équivalent du système « sol+structure », intégrant la masse M , la raideur équivalente du système k_{eq} et l'amortissement équivalent ξ_{eq} . Les deux derniers paramètres peuvent être estimés avec les expressions suivantes :

$$K_{eq} = K_{str} \frac{1}{1 + \frac{K_{str}}{K_{sol}}} \quad (8)$$

$$\xi_{eq} \approx \xi_{str} \left(\frac{f_{eq}}{f_{str}} \right)^3 + \xi_{sol} \left[1 - \left(\frac{f_{eq}}{f_{str}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Avec

$$K_{sol} = K_H \frac{1}{1 + \frac{h^2 K_H}{K_M}} \quad (10)$$

$$\frac{\xi_{sol}}{K_{sol}} \approx \frac{\xi_V}{K_V} + h_{eq}^2 \frac{\xi_M}{K_M} \quad (11)$$

où les amortissements d'ISS ξ_V et ξ_M sont plafonnés à 30 %. Cette formulation correspond à la démarche usuelle retenue dans ce type d'analyse, qui consiste à exprimer l'amortissement équivalent comme la somme pondérée par les énergies de déformation des amortissements propres à chaque composant.

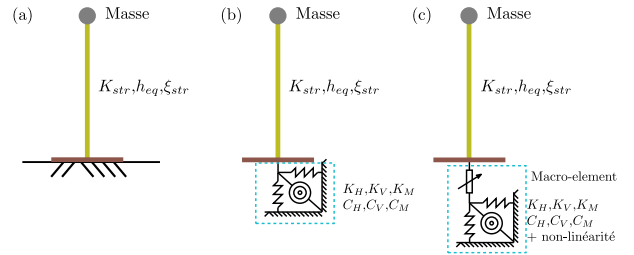


Figure 6. Modélisation de l'ISS : (a) modèle en base encastré (BF), (b) modèle d'ISS élastique linéaire (EL), et (c) modèle d'ISS non linéaire avec macro-élément (NL)

5 RESULTATS

5.1 Apport de l'ISS linéaire

5.1.1 Allongement de la période propre

Le passage d'une configuration sans ISS (Figure 6(a)) à une configuration avec ISS (Figure 6(b)) s'accompagne d'un assouplissement de la réponse du système. Il convient d'examiner l'allongement de la période propre sous la forme de rapport entre la période propre du système avec ISS T_{eq} et celle du modèle à base encastrée T_{str} (voir Figure 7).

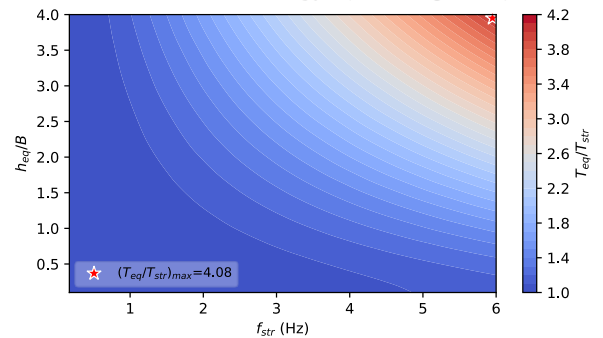


Figure 7. Allongement de la période propre lors de la prise en compte de l'ISS en fonction de la fréquence fondamentale de la structure f_{str} et du rapport d'élancement h_{eq}/B

Ce résultat met en évidence une augmentation systématique de la période propre quand on tient compte de la souplesse du système sol-fondation dans l'analyse. Il est observé que l'effet est plus marqué en présence d'une superstructure rigide et élancée. Parmi

les configurations étudiées, l'incrément peut atteindre un rapport d'environ 4 en termes de période.

5.1.2 Modification de l'amortissement du système

La prise en compte de l'ISS dans le modèle de calcul a aussi pour effet d'impacter l'amortissement équivalent du système. Le taux d'amortissement équivalent ξ_{eq} du système tenant compte de l'ISS est déterminé pour différentes configurations à l'aide de la formulation décrite au § 4.4. Il est présenté sous forme de carte d'iso-valeurs sur la Figure 8.

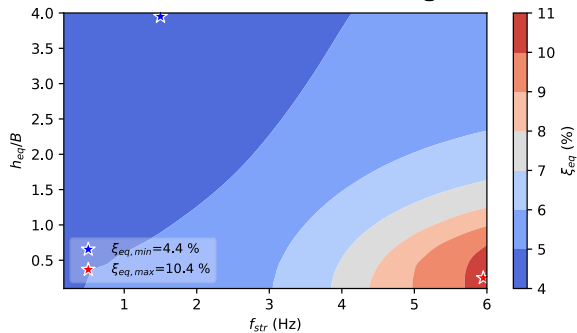


Figure 8. Amortissement équivalent en fonction de la fréquence fondamentale de la structure f_{str} (en base encastree) et du rapport d'élanement h_{eq}/B

Dans la plupart des configurations, la contribution de l'ISS augmente l'amortissement du système par rapport à celui de la structure seule (ici fixé à 5%). Cette hausse est plus marquée pour les structures rigides et peu élancées. Un amortissement équivalent ξ_{eq} de 10.4 % est obtenu pour la structure avec $f_{str} = 6$ Hz et $h_{eq}/B = 0.25$.

5.1.3 Modification de la réponse du système

La prise en compte de l'ISS modifie la réponse de la structure par rapport à la configuration à base encastree. Afin d'évaluer l'impact de cette hypothèse de modélisation sur la descente de charges transmise au support, le ratio de l'effort horizontal à la base de fondation, obtenu par les deux modèles, V_{EL}/V_{BF} , est calculé et représenté sur la Figure 9. Lorsque ce facteur est inférieur à l'unité, cela traduit une diminution de la réaction du modèle intégrant l'ISS par rapport à base fixe.

Dans ce cas précis, une diminution maximale des efforts à la base de la structure, de l'ordre de 80 %, est observée pour une superstructure relativement rigide caractérisée par une fréquence en base encastree de 6 Hz et un rapport d'élanement de 4. A l'inverse, une augmentation d'environ 33 % est constatée pour une structure présentant une fréquence de 2.8 Hz et un élanement de 1.2.

De manière générale, il ressort que plus la structure est rigide et élancée, plus la diminution des efforts sismiques à la base est importante. À l'inverse, une

structure plus souple et moins élancée pourra observer une augmentation des efforts sismiques.

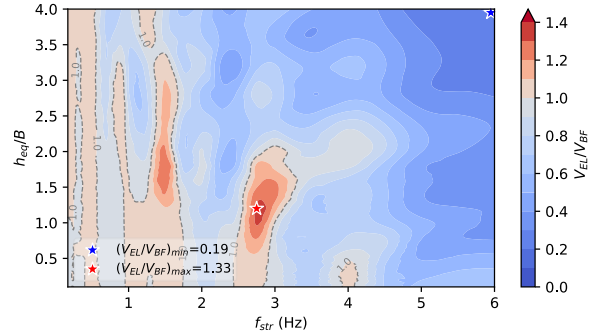


Figure 9. Rapport de l'effort horizontal obtenu par le modèle avec ISS élastique linéaire V_{EL} et celui à la base encastree V_{BF} en fonction de la fréquence fondamentale de structure f_{str} et du rapport d'élanement h_{eq}/B

5.2 Vérification de la stabilité et identification des modes de ruine

La stabilité de l'ouvrage sous séisme est étudiée pour les trois hypothèses de modélisation de l'ISS, à savoir : base encastree, ISS linéaire et ISS non-linéaire. Pour les deux premiers modèles de calcul, une approche pseudo-statique est retenue dans la vérification, en comparant les efforts de réaction obtenus à la base de la structure aux différents critères de stabilité. Une approche de vérification en déplacement est employée pour le cas non-linéaire, ce qui permet non seulement de quantifier les déplacements permanents, mais aussi d'identifier les mécanismes de stabilité sollicités en cours du calcul.

Les modes de ruine ainsi déterminés sont présentés sur le Tableau 1 pour le modèle à base encastree, sur le Tableau 2 pour celui incluant l'ISS linéaire, et sur le Tableau 3 pour le cas non-linéaire.

Pour chaque configuration étudiée, les différents modes de ruine sont précisés avec les abréviations suivantes : **OK** indique l'absence de rupture, le système reste élastique, **P** correspond à une perte de capacité portante, **G** fait référence au glissement, **D** désigne le décollement, et **R** représente le renversement conventionnel, associé à un taux de décollement supérieur ou égal à 90 %.

Les modes de ruine identifiés pour les deux premiers modèles demeurent comparables pour les configurations étudiées, à l'exception du mécanisme de glissement, qui n'est identifié que lorsque la descente de charges du modèle à base encastree est considérée. La prise en compte de l'ISS conduit de manière globale à une diminution du taux de décollement (par exemple, on n'observe plus de problème de décollement dans le cas d'une structure présentant une fréquence de 6 Hz et un élanement de 1).

Tableau 1. Modes de ruine du modèle à base encastrée

Elancement h_{eq}/B	Fréq. fondamentale structure f_{str} (Hz)				
	0.5	1	2	4	6
0.25	OK	OK	OK	P	P+G+D
0.5	OK	OK	P	P+D	P+G+D
1	OK	P+D	P+D	P+D	P+G+R
2	OK	P+D	P+R	P+R	P+G+R
4	D	P+R	P+R	P+R	P+G+R

Tableau 2. Modes de ruine du modèle avec ISS linéaire

Elancement h_{eq}/B	Fréq. Fondamentale structure f_{str} (Hz)				
	0.5	1	2	4	6
0.25	OK	OK	OK	P	P
0.5	OK	OK	P	P+D	P+D
1	OK	P+D	P+D	P+D	P+D
2	OK	P+D	P+R	P+R	P+R
4	D	P+R	P+R	P+R	P+R

Tableau 3. Modes de ruine du modèle avec ISS non-linéaire

Elancement h_{eq}/B	Fréq. Fondamentale structure f_{str} (Hz)				
	0.5	1	2	4	6
0.25	OK	OK	OK	P	P
0.5	OK	OK	OK	P	P
1	OK	D	P+D	P+D	P+D
2	OK	P+D	P+D	P+D	P+D
4	D	P+D	P+D	P+D	P+D

Les modes de ruine identifiés par le modèle ISS non-linéaire, utilisant l'approche en déplacement, présentent plusieurs différences par rapport à ceux obtenus avec l'approche en force. La perte de stabilité par renversement n'est plus observée. Le décollement étant désormais pris en compte via une loi élastique non-linéaire telle que décrite au § 3.2, la dégradation de la raideur rotationnelle est considérée de manière explicite, ce qui entraîne une modification des réactions à la base de la structure en cours de calcul ainsi que des conditions d'appui, permettant ainsi d'obtenir une estimation plus réaliste du taux de décollement, qui diminue par rapport à un modèle équivalent élastique.

Il a également été observé que, pendant le séisme, le critère de perte de capacité portante a été atteint, engendrant des déplacements irréversibles de la fondation sans pour autant atteindre un ELU sismique (apparition de déplacements irréversibles jugés inacceptables).

Il est aussi intéressant de noter que deux configurations présentant un problème de portance sur la base de l'analyse du modèle avec l'ISS linéaire en pseudo-statique ($f_{str} = 2$ et $h_{eq}/B = 0.5$; $f_{str} = 1$ et $h_{eq}/B = 1$) ne présentent plus ce problème lorsqu'une approche en déplacement avec une résolution temporelle est employée. Cette observation met en

lumière l'importance de considérer la nature transitoire de la charge sismique dans les analyses.

En effet, les forces agissant sur la fondation ou dans la masse du sol varient avec le temps et peuvent dépasser la résistance disponible du système sol-fondation pendant de courtes périodes, sans pour autant conduire à une défaillance générale de la fondation (Pecker, 1997).

5.3 ISS non-linéaire : torseur sismique et déplacement irréversible

La comparaison des torseurs sismiques issus du modèle ISS élastique linéaire (EL) et du modèle ISS non-linéaire (NL) est effectuée en termes d'effort horizontal V . Pour évaluer cette différence, le ratio V_{NL}/V_{EL} est calculé pour chaque configuration étudiée et représenté sur la Figure 10.

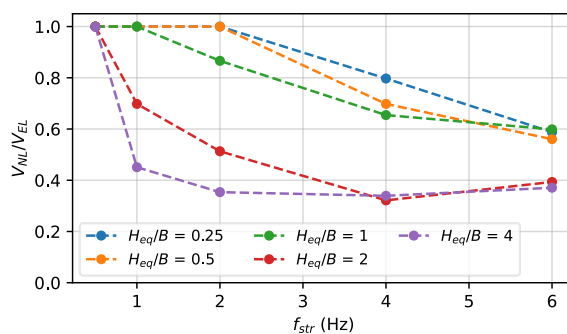


Figure 10. Rapport de l'effort horizontal entre le modèle d'ISS élastique linéaire V_{EL} et celui d'ISS non-linéaire V_{NL}

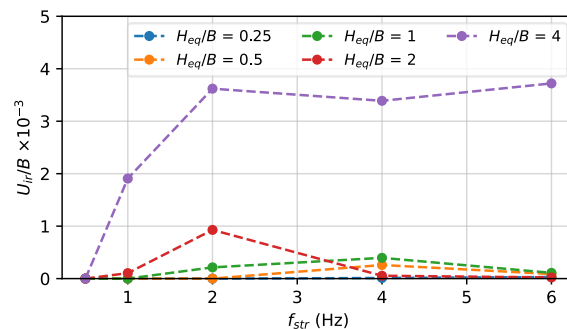


Figure 11. Déplacement horizontal irréversible

Dans le modèle ISS non linéaire, utilisant le macro-élément d'ISS, l'activation du comportement plastique à l'interface (principalement le mécanisme de perte de capacité portante) conduit à une diminution des forces horizontales pour toutes les configurations présentant un problème de stabilité vis-à-vis de la portance lors de la vérification en force. Ce constat reflète le rôle d'isolation joué par les mécanismes non-linéaires d'ISS, pouvant se développer à l'interface sol-fondation, et qui limitent la transmission d'une partie de l'énergie sismique à la superstructure (Anastasopoulos et al., 2012).

Cependant, cette réduction des efforts transmis à la structure se fait au prix d'un déplacement irréversible. L'évolution de ce déplacement, calculé pour les différentes configurations et normalisé par la largeur de la fondation, est représenté sur la Figure 11. Cette grandeur est faible dans ce cas avec des valeurs qui restent, dans tous les cas, inférieures à 0.4 % de la largeur de la fondation (4 cm).

5.4 ISS non-linéaire : taux de décollement

Les différences dans l'évaluation du décollement sont aussi analysées. Dans le modèle élastique linéaire, le taux de décollement dépasse rapidement 90 %, ce qui conduit, selon une vérification en force, à conclure à un risque de perte de stabilité par basculement. Cependant, les analyses basées sur une approche non-linéaire avec résolution temporelle montrent que les taux de décollement effectivement observés sont en réalité bien moins élevés, illustrant le caractère fortement conservatif des approches et hypothèses classiques, ainsi que l'apport des approches en déplacement pour éviter les impasses conceptuelles.

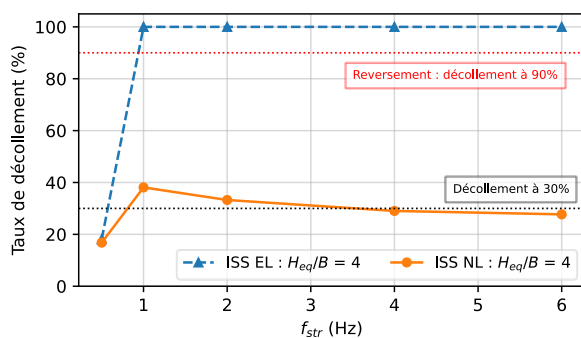


Figure 12. Taux de décollement estimé avec l'approche en force (ISS EL) et l'approche en déplacement (ISS NL) pour les configurations avec l'élancement à 4

6 CONCLUSIONS

Les approches de calcul, pseudo-statique et temporelle, ainsi que de vérification de la stabilité, en force et en déplacement, ont été comparées sur plusieurs configurations représentatives, en faisant varier les paramètres dynamiques du système et en considérant trois modélisations de l'ISS. Les principales conclusions issues de cette analyse sont les suivantes :

- La prise en compte de l'interaction sol-structure conduit à un allongement de la période propre du système, effet d'autant plus prononcé lorsque les structures sont rigides et élancées.
- La prise en compte de l'ISS n'entraîne pas systématiquement une augmentation significative de l'amortissement équivalent du système.

Lorsqu'elle existe, cette augmentation est plus marquée pour des structures rigides et peu élancées.

- Les approches de vérification de la stabilité basées sur les forces conduisent rapidement à l'impossibilité de statuer sur la stabilité de l'ouvrage, avec des résultats généralement très conservatifs. Pour la même configuration de calcul, une approche en déplacement démontre souvent que l'amplitude des déplacements permanents n'est pas de nature à compromettre la tenue de l'ouvrage au séisme.
- L'approche en déplacement, associé à un modèle d'ISS non linéaire, met en évidence une diminution significative des efforts sismiques et du taux de décollement. Cependant, cette réduction s'accompagne de déplacements irréversibles de la fondation, qui peuvent être quantifiés et utilisés comme critère de vérification.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abboud, Y. (2017). *Développement d'un macroélément pour l'étude des fondations superficielles sous charge sismique*. Ph.D. thesis, Université Paris-Est, France
- Anastasopoulos, I., Loli, M., Gelagoti, F., Kourkoulis, R., and Gazetas, G. (2012). Nonlinear soil-foundation interaction: Numerical analysis. dans: *2nd Int. Conf. on PBD in Earthquake Geotechnical Engineering*. Taormina, Italy.
- Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., et al. (2013). PEER NGA-West2 Database. PEER Report No. 2013/03.
- Brûlé, S. and Cuira, F. (2018). *Pratique de l'interaction sol-structure sous séisme : application aux fondations et aux soutènements*. AFNOR. Paris, France
- Grange, S., Kotronis, P., and Mazars, J. (2008). A macro-element for a shallow foundation to simulate Soil-Structure Interaction considering uplift *C.R. Mec.* 336(11-12) : 856-862.
- Kausel, E., Whitman, R.V., Morray, J.P., Elsabee, F. (1978). The spring method for embedded foundations. *Nuclear Engineering and Design*, 48(2-3) : 377-392.
- Ostadan, F. and Deng, N. (2012). SASSI2010 - Theoretical manual - version 1.0 edition.
- Paolucci, R., Shirato, M., and Yilmaz, M. T. (2008). Seismic behaviour of shallow foundations: Shaking table experiments vs numerical modelling *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 37(4) : 577-595
- Pecker, A., Analytical formulae for the seismic bearing capacity of shallow strip foundations, *Seismic behavior of ground and geotechnical structures*, pp. 261-268, 1997
- Pérez-Herreros, J. (2020). *Dynamic soil-structure interaction of pile foundations: experimental and numerical study*. Ph.D. thesis, Ecole Centrale Nantes, France
- Shen, Y. (2023). *Development of a macro-element of foundations under dynamic load: Application in the case of soils reinforced by rigid inclusions*. Ph.D. thesis, Institut Polytechnique de Paris, France
- Terrasol (2020). FONDSIS – Outil de calcul des ouvrages prenant en compte l'ISS linéaire et non-linéaire sous séisme