

PRISE EN COMPTE DE L'ISS DANS LA JUSTIFICATION DE LA PORTANCE SISMIQUE D'UN RADIER GENERAL

ACCOUNTING FOR SOIL STRUCTURE INTERACTION EFFECTS IN SEISMIC ANALYSIS OF A RAFT

Youssef ABOUD¹, Fahd CUIRA¹, Sébastien BURLON², Jean-François SEMBLAT³

¹ Terrasol, Paris, France

² IFSTTAR, Marne la Vallée, France

³ ENSTA, Palaiseau, France

RÉSUMÉ – Cet article présente une approche alternative pour la justification sismique d'un radier général, tenant compte des effets non linéaires de l'interaction sol structure. Cette approche s'inscrit dans la logique des méthodes pratiquées actuellement. Les résultats sont comparés à ceux issus des approches conventionnelles. La variation des coefficients de sécurité ainsi que celle des déplacements sous séisme est analysée.

ABSTRACT – This paper presents an alternative approach for the seismic analysis of a raft foundation, accounting for Soil Structure Interaction nonlinear effects. This approach is compatible with currently used methods in engineering practice. The results are compared to those from conventional analytical approaches. The variation of safety factors and induced displacements is assessed.

1. Introduction

La justification sismique des fondations superficielles demeure un enjeu important pour la sécurité des ouvrages. Cette justification nécessite la prise en compte de nombreux aspects, notamment l'interaction sol structure y compris dans le domaine non linéaire. Négliger ces aspects peut conduire à des incohérences dans la conception ne permettant pas de garantir la durabilité et la robustesse des ouvrages en zone sismique.

Pour tenir compte de l'interaction sol structure, la pratique consiste à étudier la réponse sismique de la structure reposant sur un système de ressorts et amortisseurs. Dans ce cas, l'interaction sol structure est supposée linéaire. Les propriétés des ressorts et des amortisseurs sont déduits des fonctions d'impédance. Ce cas est traité dans le §3.2.

L'hypothèse de la linéarité de l'interaction sol structure n'est pas toujours valable. En effet, dans les cas où l'accélération sismique est élevée et les propriétés du sol faibles, des non linéarités sont susceptibles d'apparaître (défaut de glissement, perte de capacité portante, etc.). Ces non linéarités doivent être prises en compte dans les calculs.

La méthode classique consiste à modéliser directement la structure, la fondation et un volume représentatif du sol, en y associant des lois de comportement non linéaire. Cette méthode peut donner des résultats qui se rapprochent de la réalité, mais est coûteuse en termes de temps de calcul et de mémoire requise.

En général, les non linéarités se développent à l'interface entre le sol et la fondation, et dans un champ proche à la fondation. Dans cet esprit, des méthodes hybrides sont basées sur une optimisation de la représentation du sol dans les méthodes directes : le champ proche est modélisé directement et le reste est remplacé par des impédances analytiques (ressorts et amortisseurs). Dans les cas où la modélisation directe du champ proche peut accroître les coûts de calcul (comportement tridimensionnel, propriétés faibles du sol, accélérations sismiques élevées, etc.), il est intéressant optimiser davantage la représentation du sol. Pour cela, une approche alternative est proposée (§3.3).

2. Contexte de l'ouvrage

2.1. Structure

La structure étudiée est un bâtiment annexe à une centrale nucléaire d'Electricité de France. Le bâtiment s'étend sur une longueur de 54 m et une largeur de 23 m. La hauteur du bâtiment est de 16.84 m, répartis sur un sous-sol et deux étages. Le bâtiment est supporté par un radier général de 1 m d'épaisseur, sur lequel il induit une charge de service égale à 170 MN.

Les fréquences propres de la structure sont 3.2 Hz, 2.9 Hz et 3.3 Hz pour les deux translations horizontales et la translation verticale respectivement.

2.2. Contexte géotechnique

Le site est constitué d'une couche de sable puis d'une couche d'argile des Flandres. Des essais de reconnaissance réalisés in situ et en laboratoire permettent de confirmer cette succession de terrain et de préciser les propriétés mécaniques de ces couches (Tableau 1).

Tableau 1. Propriétés des couches de sol

Couche	Nature	Δz (m)	γ_h (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
N1	Sable silteux	17.5	18.6	16.2	0	35°	72	1455	270
N2	Sable	7	19.5	16.9	0	40°	109	1910	315
N2-N3	Argile silteuse	2	18	12.9	100	/	15	1500	200
N3	Sable	5 - 6	21.2	17.7	0	40°	88	1910	315
N4	Argile des Flandres	> 100	~20	/	200	/	26	1840	280

Δz : épaisseur de chaque couche
 γ_h , γ_d : poids volumiques du sol sec et saturé
c, ϕ : cohésion et angle de frottement
Vp, Vs: vitesse des ondes de compression et cisaillement

2.3. Sollicitations sismiques

Pour ce site, l'aléa sismique est défini par une combinaison de trois signaux de référence : un signal synthétique de période de retour de 20 000 ans et deux signaux issus d'enregistrements réels majorés à 50%.

Cette combinaison permet de générer trois accélérogrammes correspondant chacun à l'accélération suivant une direction de l'espace (Figure 1).

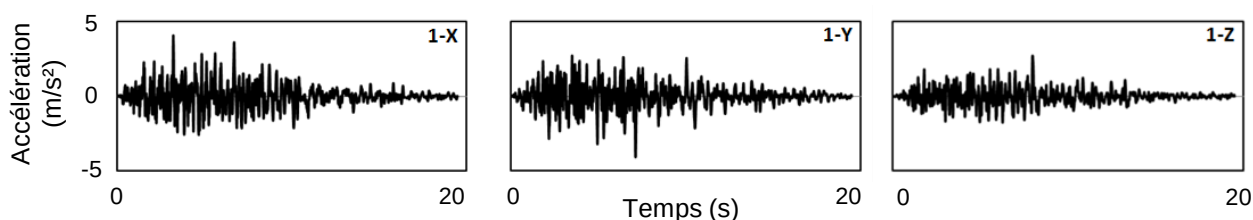


Figure 1 Accélérogrammes : (1-X) suivant x, (1-Y) suivant y, (1-Z) suivant z.

2.4. Système de repère

Dans la suite, le comportement du radier du bâtiment est analysé à l'aide de deux vecteurs tridimensionnels : un vecteur de déplacements $\{u\}$ et un vecteur d'efforts $\{F\}$.

Le vecteur de déplacements $\{u\}$ est composé de deux composantes horizontales u_{hx} et u_{hy} et d'une verticale v . Le vecteur d'efforts $\{F\}$ est composé de deux efforts horizontaux H_x et H_y , et d'un effort vertical V . La composante plastique du déplacement est désignée par l'indice pl. Elle est calculée à partir d'un algorithme spécifique (Koiter, 1960 ; Simo et Hughes, 1998)

$$\{F\}^t = (H_x, H_y, V) \quad \{u\}^t = (u_{hx}, u_{hy}, v) \quad \{u_{pl}\}^t = (u_{hxpl}, u_{hypl}, v_{pl}) \quad (1)$$

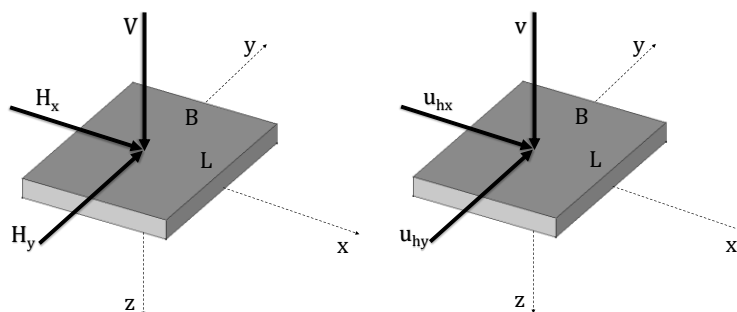


Figure 2 Fondation rectangulaire dans son repère local

3. Données des calculs réalisés

Le comportement sismique du radier du bâtiment est étudié en considérant différentes situations :

- une situation où l'interaction sol structure est négligée et le bâtiment est supposé être encastré à sa base (FIX),
- une situation où l'interaction sol structure est supposée linéaire ; le bâtiment repose sur un système de ressorts et d'amortisseurs (ISS LIN),
- une situation où un mécanisme de glissement pourrait être activé entre le radier et le sol (ISS NLIN+G),
- une situation où un mécanisme de portance peut être activé (ISS NLIN+P),
- deux situations où les mécanismes de glissement et de capacité portante peuvent être activés, séparément ou simultanément, sans écoulement (ISS NLIN+G+P) et avec écoulement (ISS NLIN+G+P+E).

La Figure 3 présente les paramètres des situations considérées dans les calculs.

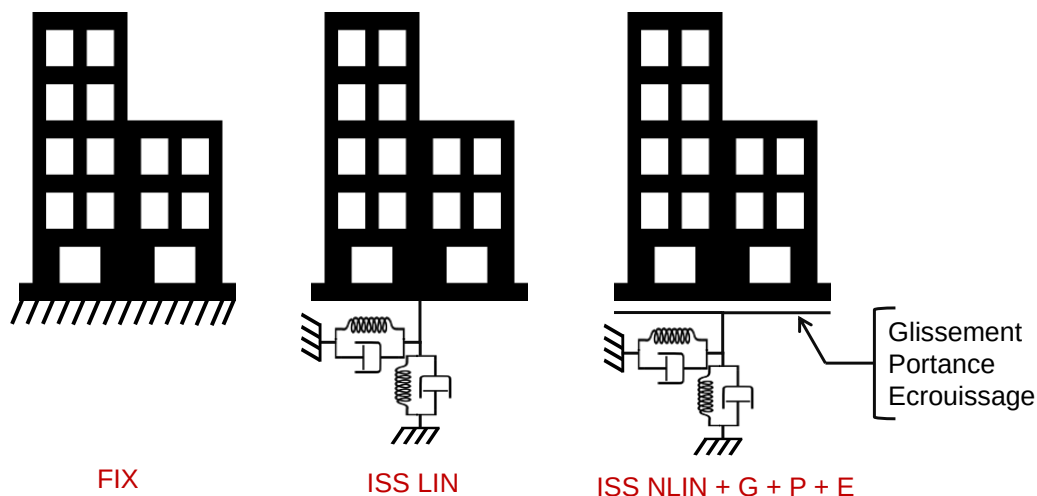


Figure 3 Différentes situations de calcul

3.1. Interaction sol structure négligée

Ce paragraphe concerne la situation dénotée FIX ci-dessus. Dans cette situation, la justification du radier sous charge sismique se fait en négligeant l'interaction sol structure. Autrement dit, la structure est supposée parfaitement encastrée à sa base.

Dans ce cas, les déplacements de la fondation sont nuls et les efforts sont estimés par une méthode simplifiée. En particulier, l'effort horizontal induit sur la fondation dans une direction donnée est estimé par le produit de la masse de la structure par son accélération maximale dans la même direction.

3.2. Interaction sol structure linéaire

Ce paragraphe concerne la situation dénotée ISS linéaire ci-dessus. Dans cette situation, la structure reposant sur un système de ressorts et d'amortisseurs est soumise aux sollicitations sismiques de la Figure 1. La charge de service de 170 MN est appliquée au préalable à la fondation. Dans chacune des directions de l'espace, un ressort et un amortisseur sont utilisés. Les propriétés de ces éléments peuvent être définies à partir de calculs analytiques ou numériques. Dans le cas présent, leurs valeurs sont fournies à partir d'un calcul analytique (tableau 2).

Tableau 2. Propriétés des ressorts et amortisseurs

Direction	K (MN/m)	C (MN/m.s)
x	$K_{hx} = 6490$	$C_{hx} = 7380$
y	$K_{hy} = 5220$	$C_{hy} = 5890$
z	$K_v = 8000$	$C_v = 18800$

3.3. Interaction sol structure non linéaire

Ce paragraphe concerne les situations où des non linéarités (glissement ou perte de capacité portante) peuvent intervenir dans le cadre de l'interaction sol structure (ISS Non linéaire + G, P, G + P et G + P + E). Dans ce paragraphe, l'approche alternative pour modéliser l'interaction sol structure non linéaire est expliquée. Elle consiste à modéliser le champ proche à l'aide d'un système d'éléments analogiques (patins et ressorts non linéaires). Les patins définissent les limites du domaine linéaire en fonction des efforts appliqués à la fondation (H_x , H_y et V) et les ressorts non linéaires servent à décrire le comportement au-delà du domaine linéaire dans le cas où un écrouissage est présent.

Deux patins sont ajoutés pour simuler deux mécanismes de plasticité : glissement et perte de capacité portante (Figure 4). Les seuils d'activation des patins sont représentés par deux fonctions : un patin est activé si la fonction correspondante est positive et vice versa.

Pour le glissement, la fonction est formulée en se basant sur un modèle de frottement de Coulomb. Cette fonction, dénotée f_s s'exprime comme suit :

$$f_s = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} - c_{inter} BL - V \tan(\phi_{inter}) \quad (2)$$

Pour la perte de capacité portante, la fonction, dénotée f_b est inspirée des formulations normatives (Eurocode 7), elle est écrite comme suit (Abboud 2017) :

$$f_b = V - (V_\infty) \left(1 - \frac{4}{\pi} \Theta \right)^2 \quad \Theta = \arctan \left(\frac{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}{V} \right) \quad (3)$$

Où V_∞ désigne la charge de rupture du sol sous la fondation, supposée égale à 3 fois la charge de service, soit 510 MN. Θ l'inclinaison de la charge résultante sur la fondation. Cette fonction s'applique pour les situations où aucun écoulement n'intervient quand la valeur retournée par f_b devient positive (P , $G + P$).

Dans le cas contraire (ISS Non linéaire + $G + P + E$), la fonction f_b s'écrit comme suit :

$$f_b = V - (V_0 + \Delta V) \left(1 - \frac{4}{\pi} \Theta \right)^2 \quad (4)$$

Où V_0 désigne la limite d'élasticité du sol sous la fondation, supposée égale à 1.5 fois la charge de service, soit 255 MN. ΔV définit une variation de la limite d'élasticité en fonction d'un déplacement plastique vertical de la fondation, dénoté v_{pl} . Le paramètre v_∞ désigne le tassement à la rupture, supposé égal à 1 m.

$$\Delta V = (V_\infty - V_0) \frac{|v_{pl}|}{|v_{pl}| + v_0} \quad v_0 = \left(\frac{V_\infty - V_0}{K_v} \right) \left[1 - \frac{v_{pl} + \frac{V_0}{K_v}}{v_\infty} \right] \quad (5)$$

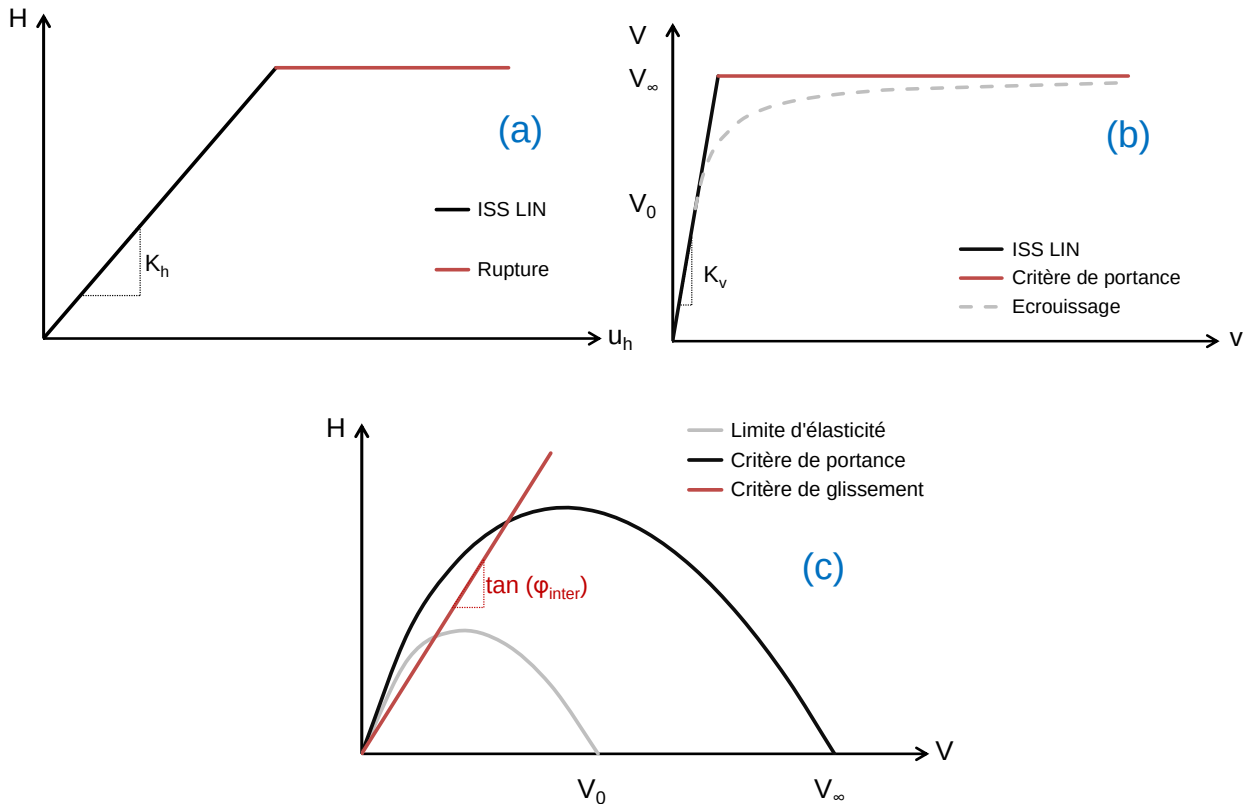


Figure 4 ISS non linéaire : (a) Mécanisme de glissement, (b) Mécanisme de portance et (c) f_b et f_s dans l'espace des efforts

4. Résultats des calculs réalisés

Un extrait des résultats des calculs réalisés sur le radier est présenté dans la suite (Figure 5 à Figure 9). Il s'agit des variations temporelles de l'effort horizontal résultant au niveau de la fondation (égal à la somme quadratique des valeurs de H_x et H_y), du déplacement horizontal résultant (égal à la somme quadratique des valeurs de u_{hx} et u_{hy}) et du déplacement vertical v .

Il convient de noter que pour le cas où l'interaction sol structure est négligée (FIX), l'effort horizontal résultant est égal à 96 MN et les déplacements de la fondation sont nuls.

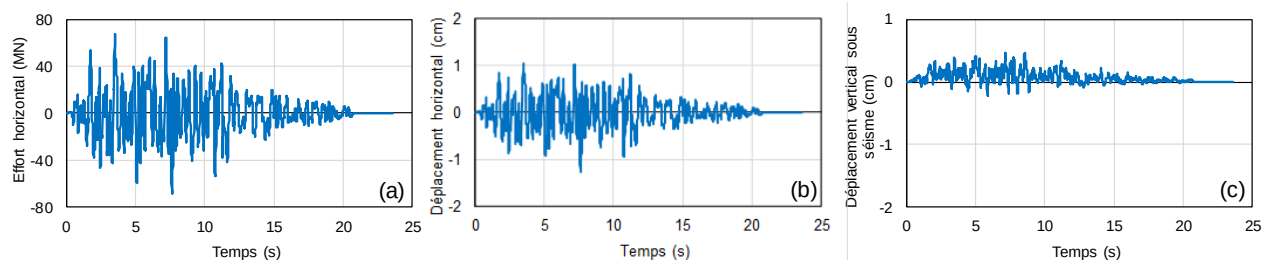


Figure 5 ISS linéaire : (a) Effort horizontal, (b) déplacement horizontal et (c) déplacement vertical sous séisme

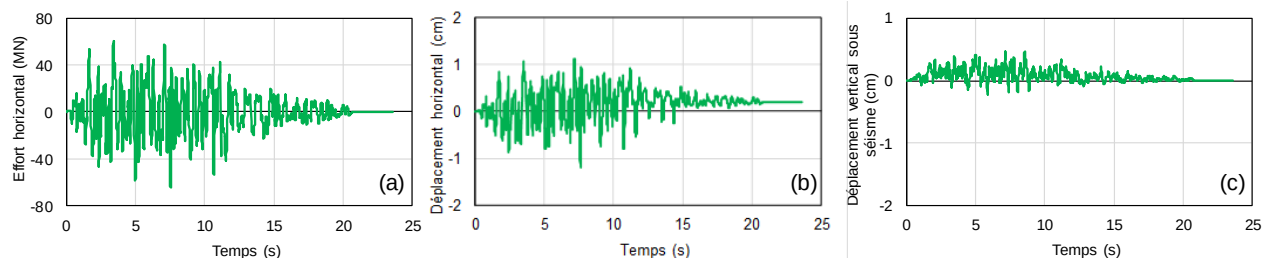


Figure 6 ISS avec glissement : (a) Effort horizontal, (b) déplacement horizontal et (c) déplacement vertical sous séisme

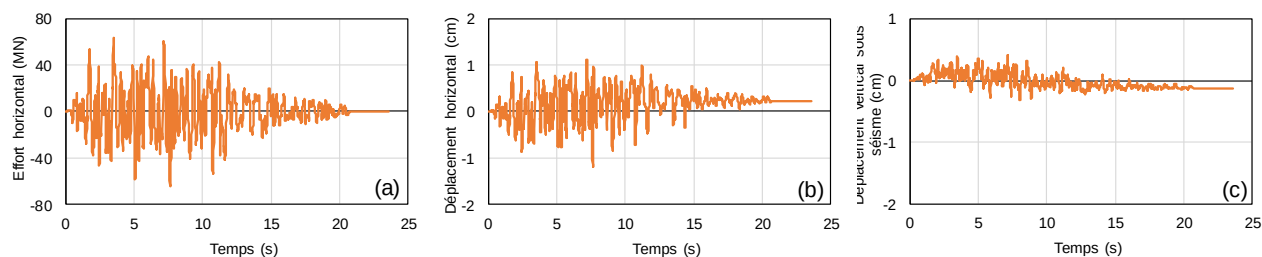


Figure 7 ISS avec perte de capacité portante : (a) Effort horizontal, (b) déplacement horizontal et (c) déplacement vertical sous séisme

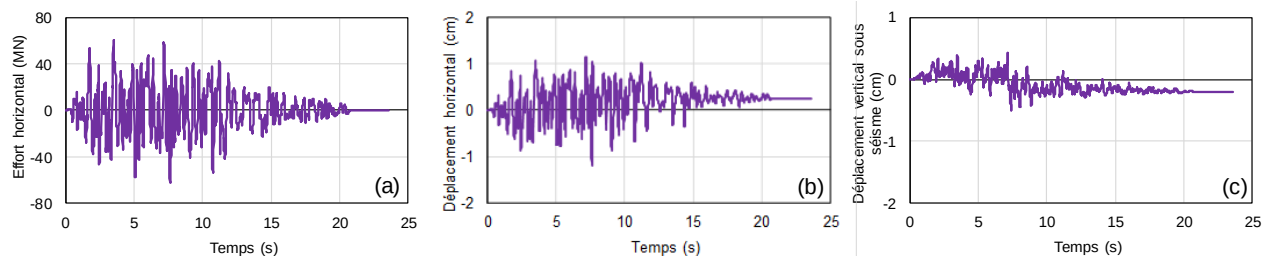


Figure 8 ISS avec glissement et perte de capacité portante (sans écrouissage) : (a) Effort horizontal, (b) déplacement horizontal et (c) déplacement vertical sous séisme

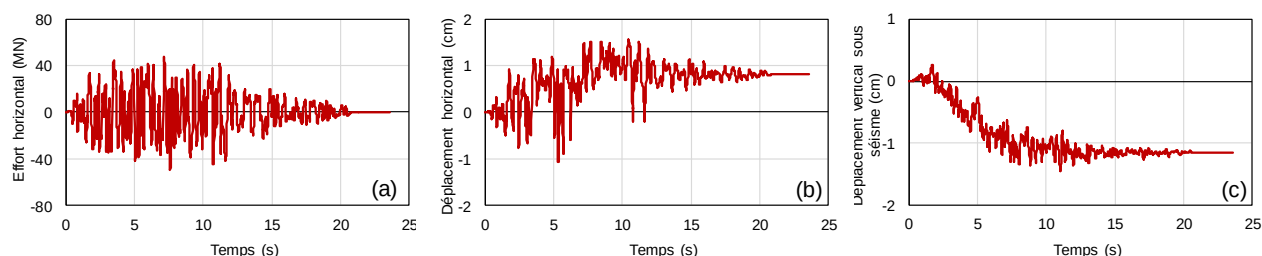


Figure 9 ISS avec glissement et perte de capacité portante (avec écrouissage) :
(a) Effort horizontal, (b) déplacement horizontal et (c) déplacement vertical sous séisme

Ces variations montrent qu'en activant des mécanismes de plasticité, on observe des variations des amplitudes des efforts et des déplacements de la fondation, ainsi que des valeurs de déplacement résiduels. En particulier, les valeurs des efforts diminuent et les valeurs des déplacements augmentent. Ce sens de variation est dû à l'effet de dissipation d'énergie par écoulement plastique : les efforts se trouvent alors plafonnés et des déplacements additionnels peuvent apparaître.

Afin de quantifier cet effet, on propose de considérer les valeurs minimales des coefficients de sécurité au glissement et à la perte de capacité portante pour les situations considérées. Ces facteurs sont calculés pour toutes les situations, indépendamment de l'activation ou non de mécanismes de plasticité.

Les facteurs de sécurité au glissement et à la portance (F_s et F_b) sont calculés par :

$$F_s = \frac{V \tan(\phi_{inter}) + c_{inter} BL}{\max\left(\sqrt{H_x^2 + H_y^2}\right)} \quad F_b = \frac{V_\infty \left(1 - \frac{4}{\pi} \Theta\right)^2}{V} \quad (6)$$

En plus des valeurs minimales des coefficients F_s et F_b , on propose d'analyser les valeurs des déplacements résiduels horizontal u_{HR} et vertical u_{VR} du radier à la fin de l'excitation sismique. Ces valeurs sont listées dans le Tableau 3. Celui-ci présente également l'effort sismique maximal mobilisé dans la direction horizontale.

Il est remarqué que dans le cas où l'interaction sol structure est négligée (FIX), les coefficients de sécurité F_s et F_b sont largement inférieurs à 1, bien qu'aucun déplacement résiduel ne soit engendré.

Tableau 3. Récapitulatif des résultats des calculs

Calcul	H_{max} (MN)	F_s	F_b	u_{HR} (cm)	u_{VR} (cm)
FIX (sans ISS)	96	0.64	0.79	0.00	0.00
ISS Linéaire	68	0.89	0.81	0.00	0.00
ISS Non linéaire + G	64	1.00	0.89	0.20	0.00
ISS Non linéaire + P	64	0.93	1.00	0.23	0.70
ISS Non linéaire + P + G	63	1.00	1.00	0.25	0.21
ISS Non linéaire + P + G + E	50	1.15	1.21	0.81	1.15

Dans le cas où l'interaction sol structure est considérée avec un comportement linéaire (LIN), les coefficients F_s et F_b augmentent de 40% et 3% respectivement. L'absence de déplacements résiduels est due à l'hypothèse de comportement linéaire.

Le coefficient F_s atteint une valeur unitaire pour la situation où le mécanisme de glissement seul est activé (ISS Non linéaire + G), vu le plafonnement de la valeur de l'effort horizontal quand f_s est positive (équation 2). Cette augmentation s'accompagne

d'une augmentation du coefficient F_b et d'une apparition d'un déplacement horizontal résiduel. L'activation du mécanisme de perte de capacité portante (ISS Non linéaire + P) fait augmenter les deux coefficients de sécurité. En fait, ce mécanisme dépend à la fois de l'effort vertical et de l'effort horizontal, et son activation entraîne un plafonnement de ces efforts et provoque les déplacements résiduels correspondants.

L'activation des mécanismes de glissement et de perte de capacité portante en même temps (ISS Non linéaire + G + P) fait évoluer les coefficients de sécurité et les déplacements résiduels dans la même direction.

Dans la situation où le phénomène d'écrouissage intervient dans le calcul (ISS Non linéaire + G + P + E), on observe une augmentation des coefficients de sécurité (supérieurs à 1) et des déplacements résiduels engendrés (de l'ordre de 1 cm). Ceci est dû à l'activation précoce du mécanisme de perte de capacité portante.

Il peut être conclu que la prise en compte de l'ISS et de ses non linéarités selon l'approche proposée (ISS Non linéaire + G + P + E) a permis d'obtenir des coefficients de sécurité admissibles au glissement et à la perte de capacité portante. D'autre part, les déplacements irréversibles engendrés sont de l'ordre de 1 cm. D'après Pender (2014), ces valeurs peuvent être tolérées. En effet, le déplacement vertical sous séisme est inférieur au tassement statique (estimé à 4.25 cm sous la charge de service de 170 MN), et le déplacement horizontal sous séisme est inférieur au déplacement vertical sous séisme.

5. Conclusions et perspectives

Cet article met en évidence l'importance de la prise en compte de l'interaction sol structure dans l'analyse du comportement sismique de radiers. Il est montré que le fait de négliger les effets de l'ISS et les non linéarités associées peut mener à des incohérences. En effet, les efforts sont majorés et les déplacements résiduels après séisme sont minorés, voire négligés. La majoration des efforts pourrait entraîner un surdimensionnement des fondations et par suite des augmentations des coûts des projets. D'autre part, une sous-estimation (voire négligence) des déplacements résiduels pourrait conduire à des mauvaises estimations de la robustesse et la serviabilité des ouvrages dans les situations post sismiques.

L'approche proposée permet une modélisation simplifiée et réaliste des non linéarités de l'ISS. Elle s'inscrit dans la continuité des méthodes utilisées dans la pratique et produit des résultats souvent plus pertinents mais également facilement exploitables pour des justifications d'ingénierie.

6. Références

- Abboud Y. (2017). Développement d'un macroélément pour l'étude des fondations superficielles sous charge sismique. Thèse de Doctorat. Paris: Université Paris-Est.
- CEN. (1996). Eurocode 7 : Calcul géotechnique - Partie 6 : fondations superficielles. AFNOR.
- Koiter, W. T. (1960). General theorems for elastic-plastic solids. Amsterdam: North-Holland, 165-220.
- NFP94-261 (2013). Justification des ouvrages géotechniques — Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 — Fondations superficielles. AFNOR
- Pender, M. J. (2014). Integrated design of structure-foundation systems: the current situation and emerging challenges, Towards Integrated Seismic Design. New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, Keynote paper no 3.
- Simo, J., & Hughes, J. C. (1998). Computational Inelasticity. Springer.