

UN CRITERE CONVENTIONNEL POUR LA JUSTIFICATION DE LA PORTANCE SISMIQUE DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

A CONVENTIONAL FRAMEWORK FOR THE SEISMIC DESIGN OF SHALLOW FOUNDATIONS

Youssef ABOUD¹, Sébastien BURLON¹, Fahd CUIRA¹
¹ Terrasol, Paris, France

RÉSUMÉ – Cet article présente un critère pour la vérification sismique des fondations superficielles. Ce critère, formulé dans un cadre conventionnel, met en jeu 3 coefficients correcteurs pour tenir compte des effets de l'inclinaison, l'excentrement et des effets d'inertie dans le sol sur la portance de la fondation. Ces coefficients sont formulés conformément aux normes en vigueur (Eurocode 7 et Eurocode 8 – Partie 5).

ABSTRACT – In this paper, a formulation for the seismic bearing capacity of shallow foundations is presented. This conventional formulation features three correction factors to account for the inclination and the eccentricity of the seismic load, and of the ground inertial forces. These factors are formulated according to the current norms (Eurocode 7 and Eurocode 8-5).

1. Spécificité du dimensionnement sismique

Le dimensionnement sismique des ouvrages nécessite la vérification de la stabilité de leurs fondations vis-à-vis d'états limites d'origine matérielle (perte de portance ou glissement) ou géométrique (basculement). En conditions sismiques, du fait de la réponse inertielle de la structure, la charge transmise à la fondation présente une inclinaison et un excentrement, ce qui est susceptible d'induire rapidement une instabilité par perte de portance de celle-ci. En plus, les efforts d'inertie induits dans le sol au passage des ondes sismiques mobilisent une partie de la résistance au cisaillement du sol et constituent un facteur additionnel de cette instabilité.

La vérification de la portance sismique d'une fondation superficielle nécessite alors la prise en compte des effets de l'inclinaison et de l'excentrement de la charge qui est transmise, ainsi que des efforts d'inertie dans le sol.

2. Vérification de la portance sismique

2.1. Charge transmise à la fondation

Le torseur d'efforts sismiques induit à la fondation est constitué d'un effort vertical N , d'un effort horizontal V et d'un moment renversant M .

Il est d'usage de normaliser les composantes de ce torseur par rapport à la valeur limite de l'effort vertical N_{\max} et la largeur de la fondation B .

$$\bar{N} = \frac{N}{N_{\max}}; \bar{V} = \frac{V}{N_{\max}} \text{ et } \bar{M} = \frac{M}{BN_{\max}} \quad (1)$$

La valeur de N_{\max} peut être calculée analytiquement à partir des propriétés de cisaillement du sol ou déduite empiriquement à partir des résultats d'essais au pressiomètre ou au pénétromètre (NFP94-261, 1997).

D'autre part, comme l'effort horizontal est dû à la réponse inertielle de la structure, le moment peut être exprimé par :

$$M = Vh \text{ et par suite } \bar{M} = \bar{V}h/B \quad (2)$$

Où h est la hauteur du centre de masse de la structure.

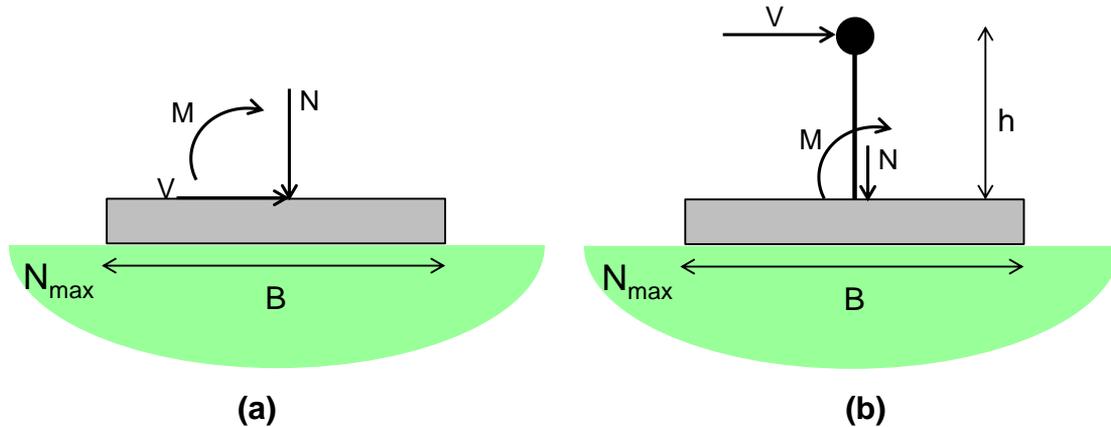


Figure 1 (a) Torseur d'efforts transmis à la fondation, (b) Relation entre M et V

2.2. Formalismes pour la vérification

Les critères de vérification de la portance sismique sont formulés dans le cadre de deux principaux formalismes :

- formalisme de l'Eurocode 8 basé sur une approche pseudo statique où le critère est écrit en fonction du torseur d'efforts sismiques et des efforts d'inertie dans le sol
- formalisme conventionnel basé sur une approche statique où le critère est écrit en fonction de l'effort vertical et de coefficients correcteurs.

Dans ce qui suit, ces deux formalismes sont présentés et expliqués. On propose ensuite un critère écrit selon un formalisme conventionnel et conforme au critère proposé dans l'Eurocode 8.

2.3. Cadre de l'Eurocode 8

La portance sismique d'une fondation superficielle est vérifiée suivant l'Eurocode 8 – Partie 5 (1998). Selon ce formalisme, le torseur d'efforts normalisé transmis à la fondation doit répondre à un critère formulé en fonction du type de comportement du sol sous séisme et des efforts d'inertie dans le sol.

$$\frac{(1-e\bar{F})^{c_T} (\beta\bar{V})^{c_T}}{\bar{N}^a \left[(1-m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^b} + \frac{(1-f\bar{F})^{c_M} (\gamma\bar{M})^{c_M}}{\bar{N}^c \left[(1-m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^d} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

Les paramètres a, b, c, d, e, f, m, k, k', c_T, c_M, c'_M, β et γ dépendent du type de comportement du sol sous séisme (cohérent ou frottant, cf §2.3.2). Les valeurs de ces paramètres sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1 Expressions alternatives pour le coefficient i₆

	Sol cohérent	Sol frottant		Sol cohérent	Sol frottant
a	0,7	0,92	k	1,22	1
b	1,29	1,25	k'	1	0,39
c	2,14	0,92	c _t	2	1,14

d	1,81	1,25	c_m	2	1,01
e	0,21	0,41	c_m'	1	1,01
f	0,44	0,32	β	2,57	2,9
m	0,21	0,96	γ	1,85	2,8

2.3.1. Efforts d'inertie

Dans l'équation 3, le terme \bar{F} désigne les efforts d'inertie dans le sol. C'est un paramètre adimensionnel calculé en fonction du type de comportement du sol sous séisme (cohérent ou frottant) et de l'accélération en surface a_h .

$$\bar{F} = \frac{\rho a_h B}{c} = \frac{a_h/g}{c/\gamma B} \text{ pour les sols cohérents et } \bar{F} = \frac{a_h/g}{\tan(\phi)} \text{ pour les sols frottants}$$

Les expressions pour \bar{F} sont dérivées d'un calcul de stabilité d'un volume élémentaire de sol de dimensions $B \times B$. Il s'agit du rapport entre la force d'inertie appliquée au volume accéléré de a_h et la résistance au cisaillement à la base de ce volume (Figure 2).

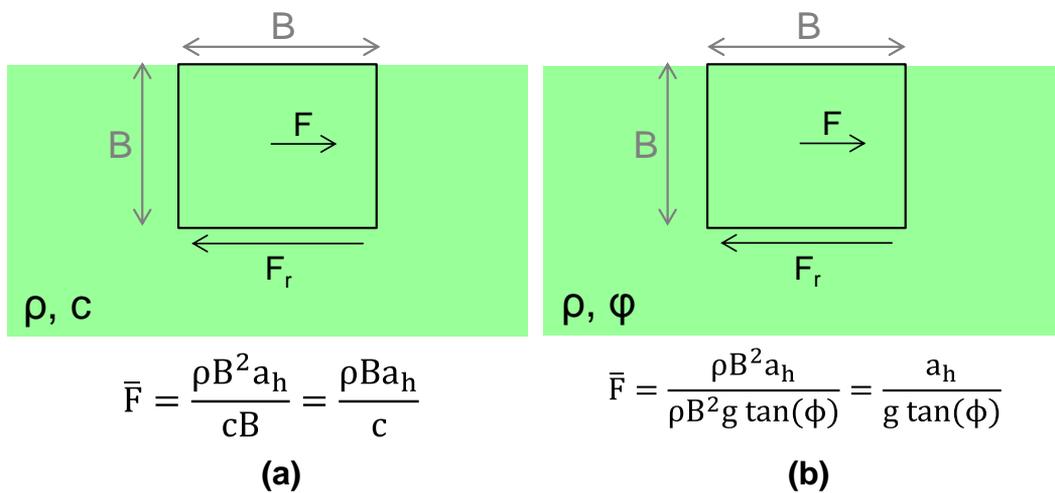


Figure 2 Expressions pour \bar{F} : (a) sol cohérent, (b) sol frottant

Une étude paramétrique du critère de l'équation 3 en fonction des valeurs de \bar{F} montre que l'effet des efforts d'inertie dans le sol est plus significatif dans le cas des sols frottants. C'est ce cas qui est retenu dans la suite, le cas des sols cohérents est examiné séparément.

2.3.2. Type de comportement du sol

Les sols sont classés selon leur comportement sous séisme en fonction de leur nature, leur perméabilité et leur position par rapport à la nappe.

Le comportement des sols situés sous nappe, ou de faible perméabilité ($<10^{-4}$ m/s) est considéré comme « fermé » sous séisme, et par suite assimilé à un comportement cohérent.

D'autre part, le comportement des sols situés hors nappe, ou constitués de graves ou de roches altérées est considéré comme « ouvert » sous séisme, et par suite assimilé à un comportement frottant.

2.4. Cadre conventionnel

Le cadre conventionnel de vérification consiste à comparer l'effort vertical N à la valeur limite N_{\max} , selon le critère suivant

$$N - N_{\max} \leq 0 \text{ Ou } \bar{N} - 1 \leq 0 \quad (4)$$

Pour tenir compte des effets sismiques, la valeur limite N_{\max} est réduite au moyen d'un facteur correcteur I . Le critère de vérification devient alors :

$$N - N_{\max} I \leq 0 \text{ ou } \bar{N} - I \leq 0 \quad (5)$$

3. Proposition du critère

3.1. Stratégie de définition du critère proposé

Le critère proposé est formulé dans un cadre conventionnel, conformément à L'Eurocode 8 (Equation 3). Le facteur correcteur I est écrit sous forme de trois coefficients correcteurs i_δ , i_e et i_g

$$N - N_{\max} i_\delta i_e i_g \leq 0 \text{ ou } \bar{N} - i_\delta i_e i_g \leq 0 \quad (6)$$

Les coefficients correcteurs i_δ et i_e tiennent compte respectivement de l'effet de l'inclinaison et l'excentrement de la charge transmise à la fondation. Ces deux coefficients sont définis indépendamment des efforts d'inertie, c.-à-d. en établissant l'équivalence entre l'équation 3 pour $\bar{F}=0$ et l'équation 6 pour $i_g=1$.

Les expressions générales des coefficients i_δ et i_e sont définies à la base des formulations courantes, et affinées à partir d'analyses basées sur la méthode de moindres carrés.

Le coefficient correcteur i_g tient compte des efforts d'inertie dans le sol. Son expression générale est définie à partir d'une analyse préliminaire, basée sur une équivalence entre l'équation 3 pour $\bar{F}>0$ et l'équation 6 pour $i_g<1$. Elle est ensuite affinée à partir d'une analyse basée sur la méthode des moindres carrés.

3.2. Coefficient correcteur relatif à l'inclinaison

L'expression générale pour ce coefficient est définie comme une fonction décroissante de l'inclinaison de la charge. Elle est donnée par :

$$i_\delta = (1 - \bar{V}/\bar{N})^{m_H} \quad (7)$$

La valeur $m_H = 3.7$ donne une équivalence du critère proposé à celui de l'Eurocode 8.

3.3. Coefficient correcteur relatif à l'excentrement

L'expression générale pour ce coefficient est définie à la base de la réduction dite de Meyerhof (i.e. B-2e). Elle est donnée par :

$$i_e = (1 - 2M/BN)^{m_M} = (1 - 2\bar{M}/\bar{N})^{m_M} \quad (8)$$

La valeur $m_M = 2.0$ donne une équivalence du critère proposé à celui de l'Eurocode 8.

3.4. Coefficient correcteur relatif aux efforts d'inertie dans le sol

L'expression générale de i_g est établie à partir d'une analyse préliminaire, où une valeur apparente de i_g est calculée pour chaque point de la surface correspondante au critère formulé par l'équation 6.

Pour un sol frottant, l'expression générale de i_g est :

$$i_g = (1 - \bar{F}^\alpha)^\beta \quad (9)$$

L'analyse affinée à partir de la méthode des moindres carrés aboutit à $\alpha = 1.2$ et $\beta = 0.6$.

D'autre part, l'analyse préliminaire met en évidence l'impact non significatif des efforts d'inertie pour un sol cohérent. En effet, cette analyse a montré que pour $\bar{F}=1$, i_g vaut 0.9. Ceci est équivalent à une réduction de N_{max} du même ordre de grandeur d'un possible écart sur sa valeur calculée. On admet donc que l'effet des efforts d'inertie peut être négligé dans le cas d'un sol cohérent sous réserve d'assurer une marge de sécurité suffisante (Pecker, 1997). Une valeur de $i_g = 1$ peut être donc retenue pour le cas d'un sol cohérent sous séisme.

3.5. Validité du critère proposé

La pertinence du critère proposé est d'abord vérifiée analytiquement à partir de la comparaison des projections du critère proposé et de celui de l'Eurocode 8 dans le plan (\bar{N}, \bar{V}) pour différentes valeurs de l'élanement de la structure (h/B). La Figure 3 montre ces comparaisons pour $\bar{F}=0$, ce qui permet d'évaluer la pertinence de i_δ et i_e . Un critère de l'Eurocode ($m_H = 3$ et $m_M = 2$) est ajouté à titre de comparaison. La Figure 4 et la Figure 5 montrent les comparaisons pour $\bar{F}=0.2$ et $\bar{F}=0.6$ respectivement.

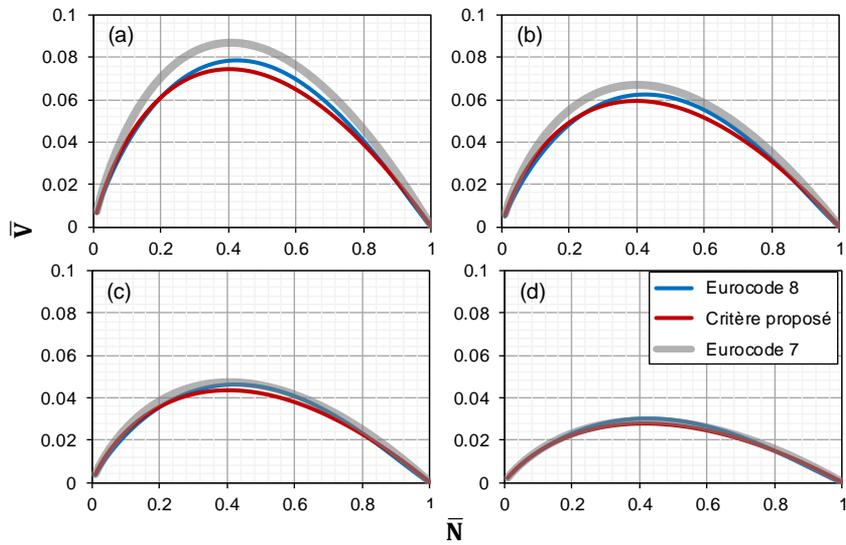


Figure 3 Comparaisons pour $\bar{F}=0$ (a) $h/B = 0.2$, (b) $h/B = 0.5$, (c) $h/B = 1$, (d) $h/B = 2$

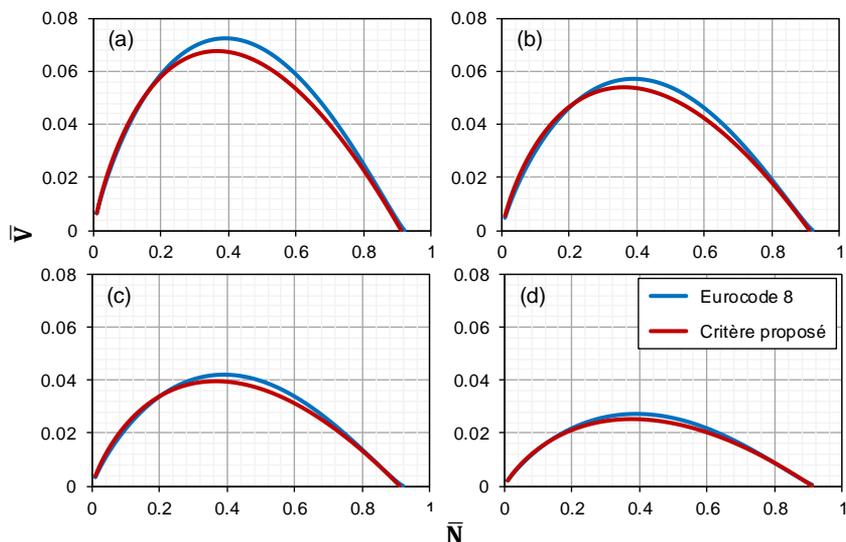


Figure 4 Comparaisons pour $\bar{F}=0.2$ (a) $h/B = 0.2$, (b) $h/B = 0.5$, (c) $h/B = 1$, (d) $h/B = 2$

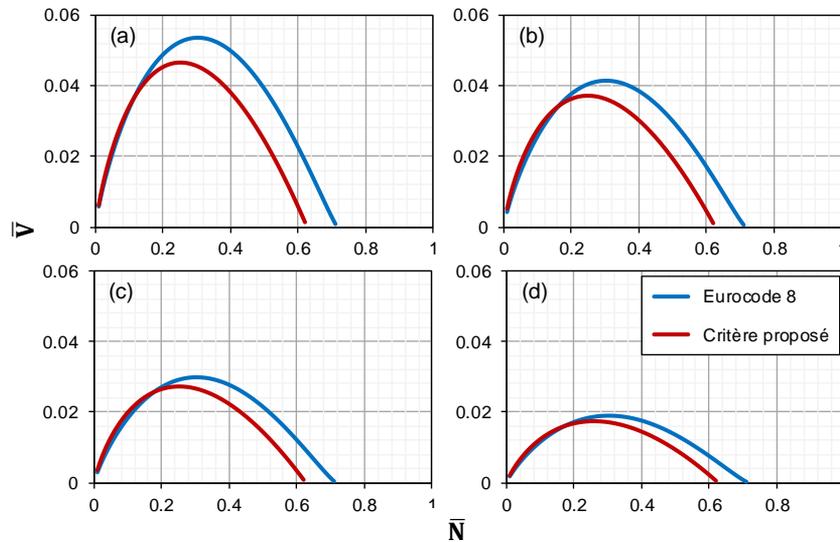


Figure 5 Comparaisons pour $\bar{F}=0.6$ (a) $h/B = 0.2$, (b) $h/B = 0.5$, (c) $h/B = 1$, (d) $h/B = 2$

4. Exemple d'application

La pertinence du critère proposé est ensuite testée à travers d'un exemple d'application. On s'intéresse d'abord à la comparaison du coefficient de sécurité relatif à la portance calculé selon l'Eurocode 8 et selon le critère proposé, et ce pour différents paramètres d'entrée. Puis, les effets sismiques sur la portance sont affichés séparément à l'aide du critère proposé, et ce pour montrer le poids de chacun d'eux.

4.1. Hypothèses

L'exemple d'application concerne la justification sismique de la fondation d'un ouvrage fondé sur une semelle filante de largeur B (Figure 6a). Le sol sous-jacent est un sable avec un angle de frottement de 33° . L'exercice est réalisé pour des accélérations horizontales en surface a_h allant de 1 à 4 m/s^2 . L'amplification spectrale S_e (liée à la réponse inertielle de la structure) varie entre 1 et 2.5. Le produit $S_e \cdot a_h$ varie alors de 1 à 10 m/s^2 environ.

Le coefficient de sécurité relatif à la portance sismique de la semelle est calculé selon l'Eurocode 8 et selon le critère proposé, pour différents élancements de l'ouvrage, coefficients de sécurité statique et produits $S_e \cdot a_h$.

Les valeurs testées pour l'élancement de l'ouvrage (h/B) sont : 0.2, 0.5, 0.8 et 1.5.

Les valeurs testées pour le coefficient de sécurité statique, défini comme le rapport entre la valeur limite N_{max} et l'effort vertical N sont : 1.5, 2, 3, 5 et 8. De ce fait, les valeurs de \bar{N} sont respectivement 0.66, 0.5, 0.33, 0.2 et 0.125.

Le torseur d'efforts sismiques normalisés est donc calculé par :

$$\begin{cases} \bar{N} \text{ donné} \\ \bar{V} = \bar{N} \cdot S_e a_h / g \\ \bar{M} = \bar{V} \cdot \frac{h}{B} \end{cases} \quad (10)$$

Le coefficient de sécurité selon l'Eurocode 8 est égal à la réduction qui doit être appliquée à N_{max} (ou autrement dit, la pondération à appliquer aux composantes du torseur d'efforts normalisé \bar{N} , \bar{V} et \bar{M}) pour que l'équation (3) soit vérifiée.

Le coefficient de sécurité selon le critère proposé est calculé par

$$F_s = \frac{i_\delta i_e i_g}{\bar{N}} \quad (11)$$

4.2. Evaluation de la sécurité vis-à-vis de la portance

La Figure 6b illustre la comparaison des coefficients de sécurité calculés selon l'Eurocode 8 et selon le critère proposé, pour les paramètres expliqués dans §4.1.

La comparaison des valeurs montre que le critère proposé permet de reproduire le critère de l'Eurocode 8 pour le calcul du coefficient de sécurité.

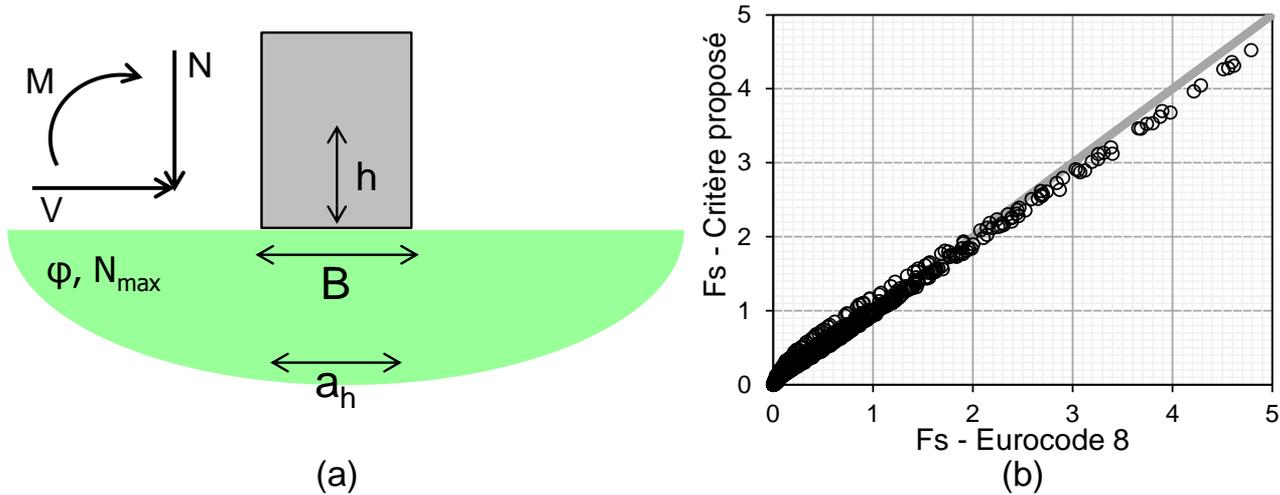


Figure 6 Comparaison du coefficient de sécurité calculé selon l'Eurocode 8 ou selon le critère proposé.

4.3. Evaluation affinée de l'influence des effets sismiques

Le critère proposé permet également d'exprimer explicitement et de façon séparée les effets de l'inclinaison, de l'excentrement et des efforts d'inertie dans le sol.

Afin de mieux expliquer cet avantage, on propose d'étudier en détail deux séries de calculs listés dans le Tableau 2.

Bien que les coefficients de sécurité obtenus pour les calculs de chaque série soient proches (~1.5 pour la série 1 et ~2.5-2.6 pour la série 2), les influences de chacun des effets (inclinaison, excentrement et efforts d'inertie) sont différentes. Ces influences sont illustrées sur la Figure 7, qui montre que même pour un coefficient de sécurité proche, un effet peut être prépondérant sur les autres.

Tableau 2 Calculs choisis pour une analyse détaillée

		a_h (m/s ²)	S_e	h/B	\bar{N}	\bar{V}	\bar{M}	F_s (critère proposé)
Série 1	Calcul 1.1	1.00	2.25	0.2	0.20	0.045	0.009	1.51
	Calcul 1.2	2.50	1.25	0.2	0.10	0.031	0.006	1.51
	Calcul 1.3	3.00	1.00	0.2	0.10	0.030	0.006	1.52
	Calcul 1.4	1.25	1.00	0.2	0.33	0.041	0.008	1.52
	Calcul 1.5	1.25	1.75	0.2	0.20	0.044	0.009	1.52
	Calcul 1.6	1.75	1.50	0.5	0.10	0.026	0.013	1.53
Série 2	Calcul 2.1	1.00	1.50	1.0	0.10	0.015	0.015	2.51
	Calcul 2.2	1.25	1.00	0.2	0.20	0.025	0.005	2.51
	Calcul 2.3	1.25	2.00	0.2	0.10	0.025	0.005	2.55
	Calcul 2.4	1.00	1.00	0.5	0.20	0.020	0.010	2.56
	Calcul 2.5	1.00	1.25	0.2	0.20	0.025	0.005	2.57
	Calcul 2.6	1.00	2.50	0.2	0.10	0.025	0.005	2.61

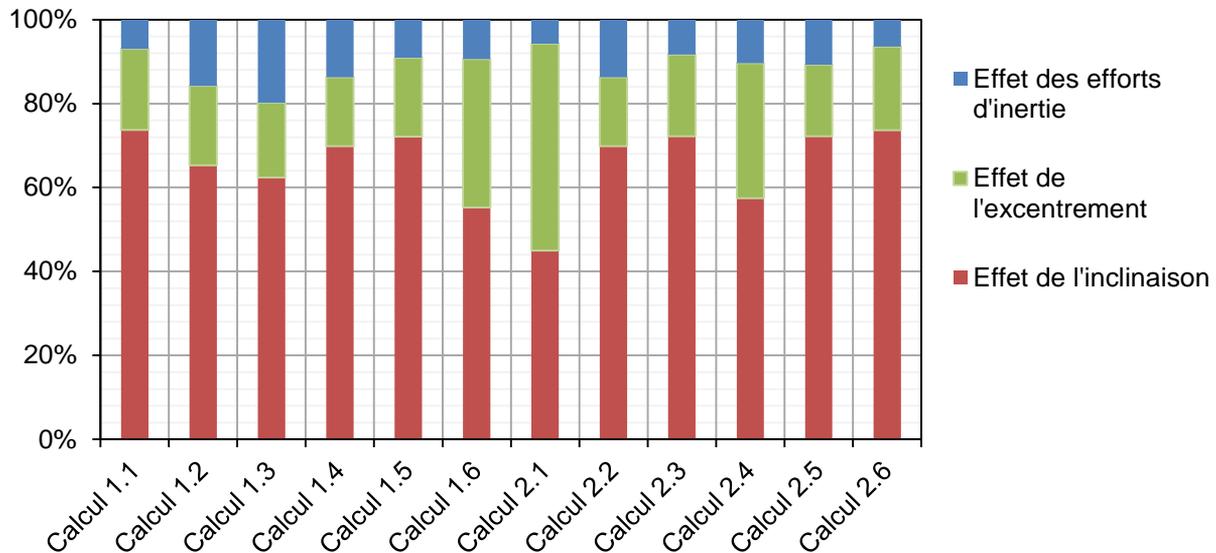


Figure 7 Influence des différents effets sur le coefficient de sécurité sismique.

5. Pertinence du critère proposé

Cet article présente la formulation d'un critère conventionnel pour la vérification de la portance sismique d'une fondation superficielle. Ce critère met en jeu trois coefficients correcteurs, qui tiennent compte de l'effet de l'inclinaison et de l'excentrement de la charge sismique et de l'effet des efforts d'inertie dans le sol.

Le critère est exprimé comme suit :

$$\bar{N} - i_g i_\delta i_e \leq 0$$

$$i_\delta = \left(1 - \frac{\bar{V}}{\bar{N}}\right)^{3.7} \text{ et } i_e = \left(1 - 2\frac{\bar{M}}{\bar{N}}\right)^2 \quad (12)$$

$$i_g = (1 - \bar{F}^{1.2})^{0.6} \text{ (sols frottants) et } i_g = 1 \text{ (sols cohérents)}$$

Ce critère est compatible avec la formulation de l'Eurocode 8 pour la portance sismique des fondations superficielles. Il donne une expression explicite des effets d'inertie dans le sol et permet d'exprimer les effets sismiques de manière décomposée.

Ce critère peut être également utilisé pour les vérifications de la portance à l'échelle locale, en fonction de la contrainte :

$$q - q_{max} i_g i_\delta i_e \leq 0 \quad (13)$$

Il peut être aisément utilisé comme seuil de plasticité du sol dans les calculs temporels non linéaires (calculs selon l'approche macroélément par exemple).

6. Références

- NFP94-261 (2013). Justification des ouvrages géotechniques — Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 — Fondations superficielles. AFNOR
- CEN. (1998). Eurocode 8 - Partie 5: Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes. Commission Européenne de Normalisation.
- Pecker, A. (1997). Analytical formulae for the seismic bearing capacity of shallow strip foundations. *Seismic Behaviour of Ground and Geotechnical Structures*, 261-268. Rotterdam, Pays-Bas: Balkema.