

Calcul des coefficients de poussée et de butée sous charges sismiques – Une nouvelle approche

Calculation of active and passive earth pressure coefficients under seismic loading – An innovative method

Caroline GIRARD¹, Sébastien BURLON², Khoa Van NGUYEN^{1*}, Youssef ABBOUD¹, Gilles VALDEYRON²

1 Terrasol, Paris, France

2 Cerema, Champs-sur-Marne, France

*khoaavan.nguyen@setec.com

RESUME : Le calcul des coefficients de poussée et de butée sous charges sismiques a été largement revu dans le cadre de la 2^{ème} génération des Eurocodes au sein de la Partie 5 de l'Eurocode 8. Deux approches sont proposées : l'une basée sur l'utilisation de relations issues des travaux de Lancelotta (2007), l'autre basée sur l'utilisation du principe de rotation et de modification du poids volumique présenté par Seed (1970). L'objectif de cet article est d'exploiter la seconde approche et de présenter un coefficient i_g permettant de déduire les coefficients de poussée et de butée en conditions sismiques à partir de ceux en conditions statiques. Le coefficient i_g est issu du rapport entre le coefficient de poussée (de butée) en conditions sismiques et le coefficient de poussée (de butée) en conditions statiques en considérant un milieu non pesant. Ce coefficient est ensuite combiné aux coefficients de Caquot, Kerisel et Absi pour les milieux pesants. Les résultats de l'approche ainsi développée sont comparés à ceux issus des travaux de Lancelotta tels que présentés dans la Partie 5 de l'Eurocode 8 et à des résultats obtenus par l'approche cinématique du calcul à la rupture au moyen de spirales logarithmiques. Les comparaisons réalisées montrent que le coefficient i_g obtenu analytiquement par cette nouvelle approche permet une estimation tout à fait fiable des coefficients de poussée et de butée en conditions sismiques. Le travail de l'ingénieur s'en trouve ainsi simplifié. De manière plus large, ces comparaisons tendent à montrer que le principe de rotation peut s'appliquer à tout coefficient de poussée et de butée supposé valide en conditions statiques.

ABSTRACT: The calculation of active and passive earth pressure under seismic loads has been extensively revised in the second generation of Eurocodes in Part 5 of Eurocode 8. Two approaches are proposed: one based on the use of relationships derived from the work of Lancelotta (2007), the other based on the use of the principle of rotation and modification of weight density presented by Seed (1970). The aim of this article is to use the second approach and present a coefficient i_g that can be used to deduce the active and passive earth pressure coefficients under seismic conditions from those under static conditions. The coefficient i_g is derived from the ratio between the earth pressure coefficient under seismic conditions and the earth pressure coefficient under static conditions, considering weightless ground conditions. This coefficient is then combined with the Caquot, Kerisel and Absi coefficients for weighted ground conditions. The results of the approach developed in this way are compared with those from Lancelotta's work as presented in Part 5 of Eurocode 8 and with results obtained using the kinematic approach of yield analysis using logarithmic spirals. The comparisons carried out show that the coefficient i_g obtained analytically using this new approach provides a highly reliable estimate of the active and passive earth pressure coefficients under seismic conditions. This simplifies the engineer's work. More broadly, these comparisons tend to show that the rotation principle can be applied to any thrust and bearing coefficient assumed to be valid under static conditions.

Mots-clés: sismique, poussée, butée, principe de rotation.

1 INTRODUCTION

Le calcul des pressions de poussée et de butée du sol reste un enjeu majeur pour la conception des murs de soutènement ou des écrans de soutènement, tant dans des conditions statiques que sismiques.

Traditionnellement, les pressions de poussée et de butée du sol sont calculées en appliquant un principe de superposition qui conduit à prendre en compte

trois types de coefficients, à l'aide du théorème des états correspondants (Caquot, 1934, Caquot et Kerisel, 1949) : un coefficient de poussée du sol K_{ay} ou un coefficient de butée du sol K_{py} pour les conditions de sol pesants, un coefficient de pression active du sol K_{aq} ou un coefficient de pression passive du sol K_{pq} pour les conditions de sol non pesants, un coefficient de pression active du sol K_{ac} ou un coefficient de pression passive du sol K_{pc} pour les

sols cohérents. En conditions sismiques, l'utilisation du principe de rotation (Seed et Whitman, 1970) permet de déduire des coefficients de poussée et de butée.

Dans cet article, dans un premier temps, il s'agit d'évaluer cette méthode en la comparant à l'approche proposée dans la partie 5 de l'Eurocode 8 (EN 1998-5) (CEN, 2024) dans sa deuxième génération et à une méthode dérivant de l'approche extérieure du calcul à la rupture. Dans un second temps, il s'agit de proposer une nouvelle approche simplifiée permettant d'obtenir les coefficients de poussée et de butée en conditions sismiques au moyen d'un coefficient correcteur tenant compte des composantes horizontales et verticales de l'accélération sismique.

2 DEVELOPPEMENT THEORIQUE

2.1 Principe de rotation

Le principe de rotation (Seed and Whitman, 1970) consiste à rendre compte de l'action sismique en procédant à une rotation de la géométrie du système étudié et en modifiant la gravité selon les équations suivantes :

$$\theta_{eq} = atan \left(\frac{a_h}{1 \pm a_v} \right)$$

$$\lambda^* = \lambda \pm \theta_{eq} \quad \text{et} \quad \beta^* = \beta \pm \theta_{eq}$$

$$\gamma^* = \gamma \frac{(1 \pm a_v)}{\cos \theta_{eq}} \quad \text{et} \quad q^* = q \frac{(1 \pm a_v)}{\cos \theta_{eq}}$$

avec a_h et a_v , les composantes horizontales et verticales de l'action sismique, λ le fruit de l'écran, β la pente du terrain à l'arrière de l'écran et γ le poids volumique du terrain en amont ou en aval de l'écran.

Des coefficients de poussée et de butée peuvent être évalués en conditions sismiques à partir des paramètres λ^* et β^* moyennant ce principe de rotation à partir de toute relation permettant de calculer en conditions statiques des coefficients de poussée et de butée de manière fiable. Il faut aussi tenir compte de la modification de la gravité au moyen du terme γ^* traduisant le poids volumique modifié.

Pour rappel, la formule dite de Mononobe - Okabe correspond à l'approche de Coulomb à laquelle sont appliqués ces principes de rotation.

En conditions statiques, si la résultante du vecteur contrainte en poussée ou en butée est définie par :

$$\sigma_a = K_{a\gamma}(\beta, \lambda)\gamma l \quad \text{et} \quad \sigma_p = K_{p\gamma}(\beta, \lambda)\gamma l$$

avec $K_{a\gamma}(\beta, \lambda)$ et $K_{p\gamma}(\beta, \lambda)$ lus par exemple dans les tables de Kerisel et Absi (1990) et l l'abscisse curviligne le long de l'écran, en conditions sismiques, la résultante du vecteur contrainte en poussée ou en butée est définie par :

$$\sigma_{Ea} = K_{a\gamma}(\beta^*, \lambda^*)\gamma^* l = K_{aE}\gamma l$$

$$\sigma_{Ep} = K_{p\gamma}(\beta^*, \lambda^*)\gamma^* l = K_{pE}\gamma l$$

2.2 Approchée simplifiée proposée

Il est proposé d'utiliser les coefficients correcteurs multiplicatifs $i_{g,a}$ et $i_{g,p}$ définis ci-après qui tiennent compte à la fois de la rotation du système et de la modification de la gravité. Ainsi, les coefficients de poussée et de butée en conditions sismiques peuvent être estimés à partir des coefficients correspondants en conditions statiques et de ces coefficients correcteurs :

$$K_{aE} = K_{a\gamma}i_{g,a} \quad K_{pE} = K_{p\gamma}i_{g,p}$$

- en poussée :

$$i_{g,a} = \frac{(1 \pm a_v)}{\cos \theta_{eq}} \frac{\cos \beta + \sin \varphi \cos \omega_\beta}{\cos(\beta + \theta_{eq}) + \sin \varphi \cos \omega_{\beta + \theta_{eq}}} e^{-2\kappa_a \tan \varphi}$$

avec :

$$\kappa_a = \frac{\omega_\beta - \omega_{\beta + \theta_{eq}} - \theta_{eq}}{2}; \sin \omega_{\beta + \theta_{eq}} = \frac{\sin \omega_{\beta + \theta_{eq}}}{\sin \varphi} \quad \text{et}$$

$$\sin \omega_\beta = \frac{\sin \omega_\beta}{\sin \varphi}$$

- en butée :

$$i_{g,p} = \frac{(1 \pm a_v)}{\cos \theta_{eq}} \frac{\cos \beta - \sin \varphi \cos \omega_\beta}{\cos(\beta - \theta_{eq}) - \sin \varphi \cos \omega_{\beta - \theta_{eq}}} e^{2\kappa_p \tan \varphi}$$

avec :

$$\kappa_p = \frac{\omega_\beta - \theta_{eq} - \omega_{\beta - \theta_{eq}}}{2}; \sin \omega_{\beta - \theta_{eq}} = \frac{\sin \omega_{\beta - \theta_{eq}}}{\sin \varphi} \quad \text{et}$$

$$\sin \omega_\beta = \frac{\sin \omega_\beta}{\sin \varphi}$$

Les conventions de signe sont les mêmes qu'en conditions statiques.

Ces coefficients proviennent de l'analyse des coefficients de poussée et de butée de (Herminier et Absi, 1962) en conditions statiques et sismiques moyennant le principe de rotation de (Seed et Whitman, 1970). Par construction, ces coefficients sont indépendants de l'obliquité des contraintes δ et du fruit du parement λ .

Ainsi, en conditions sismiques, la résultante du vecteur contrainte en poussée ou en butée est définie par :

$$\sigma_{Ea} = i_{g,a}\sigma_a = i_{g,a}K_{a\gamma}(\beta, \lambda)\gamma l$$

$$\sigma_{Ep} = i_{g,p}\sigma_p = i_{g,p}K_{p\gamma}(\beta, \lambda)\gamma l$$

3 VALIDATION

3.1 Comparaison avec l'approche de Lancelotta (EN 1998-5)

Les figures suivantes présentent la valeur de K_{aE} (poussée) ou K_{pE} (butée) en fonction de la rotation équivalente θ_{eq} (traduisant l'intensité du séisme).

Le cas présenté correspond à celui de l'annexe F ; figure F.2 du document CEN (2024) Eurocode 8-Partie 5 (pr EN 1998-5), avec $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 2/3 \Phi$, $\Phi = 30^\circ$ et $a_v = 0$.

Trois approches de calculs sont présentées :

- (i) l'approche de la norme EN 1998-5 ;
- (ii) l'approche i_{g1} où K_E est défini comme suit : $K_E = K_a$ (Caquot Kerisel – milieu pesant). i_g
- (iii) l'approche i_{g2} : $K_E = K_a$ (Lancelotta – milieu non pesant). i_g .

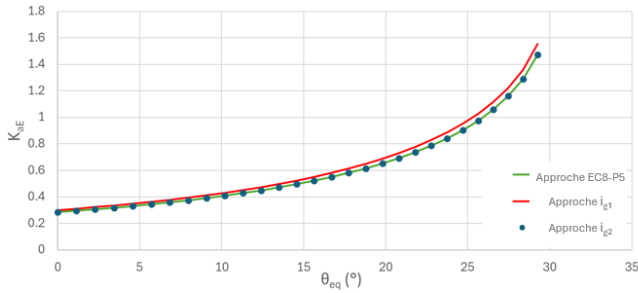


Figure 1 : Valeur de K_{aE} en fonction de l'angle de rotation équivalent θ_{eq} . Cas : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 2/3 \Phi$, $\Phi = 30^\circ$ et $a_v = 0$.

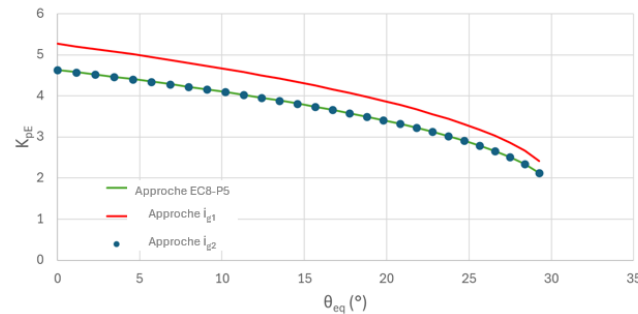


Figure 2 : Valeur de K_{pE} en fonction de l'angle de rotation équivalent θ_{eq} . Cas : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = -2/3 \Phi$, $\Phi = 30^\circ$ et $a_v = 0$.

En poussée (Figure 1), les trois approches présentées sont très proches et aucun écart significatif ne peut être mis en évidence. L'approche proposée par l'EN 1998-5 est identique à l'approche i_{g2} : on peut en déduire que l'approche proposée par Lancelotta (2007) est ainsi identique à l'approche de l'Herminier et Absi (1962) à laquelle le principe de rotation est appliqué.

En butée (Figure 2), l'approche proposée par l'EN 1998-5 et l'approche proposée au moyen du

coefficient i_{g2} sont identiques démontrant à nouveau que l'approche proposée par Lancelotta (2007) est identique à l'approche de l'Herminier et Absi (1962) à laquelle le principe de rotation est appliqué. L'approche au moyen du coefficient i_{g2} donne des coefficients de butée plus importants : cela est dû au fait que l'approche de l'Herminier et Absi (1962) et de celle de Lancelotta (2002, 2007) sous-estiment déjà le coefficient de butée en conditions statiques.

3.2 Comparaison avec la méthode de calcul à la rupture

3.2.1 Description du calcul à la rupture

L'approche cinématique du calcul à la rupture constitue un cadre théorique rigoureux pour l'évaluation de la stabilité de différents systèmes mécaniques.

Cette évaluation se base sur une comparaison entre le moment des efforts extérieurs (noté M_e) appliqués au système et le majorant du moment des efforts résistants internes (notée M_{rm}). On parle d'un état d'équilibre limite lorsque $M_{rm} = M_e$.

Ces moments sont calculés en considérant un champ de vitesse pour lequel le moment des efforts résistants internes M_{rm} sera maximal et en se basant sur le critère de rupture du matériau.

Pour les vérifications de la stabilité des terrains, le système étudié est un volume de sol délimité par une surface de rupture définie à partir d'un champ de vitesse majorant M_{rm} . Le critère de rupture en jeu est un critère de Mohr-Coulomb et le moment M_{rm} est égal au moment des efforts résistants liés au sol sur la frontière du volume de sol au niveau de la surface de rupture.

Salençon (1974) a démontré qu'une surface de rupture constituée de successions d'arcs de spirales logarithmiques fournit cette majoration.

L'idée est de chercher les valeurs de certaines grandeurs (propriétés de cisaillement, forces) pour lesquelles un état d'équilibre limite est atteint ($M_{rm} = M_e$). Ces valeurs sont ensuite interprétées pour en déduire des résultats utiles dans la pratique de l'ingénierie.

Par exemple, le coefficient de sécurité F peut être défini comme étant la dégradation appliquée aux propriétés de cisaillement pour atteindre un état d'équilibre limite.

3.2.2 Comparaison des deux approches

Les résultats de $K_{a,i_{g,a}}$ et $K_{p,i_{g,p}}$ (table de Kerisel et Absi, 1990 - i_{g1}) sont comparés aux valeurs de K_{aE} et K_{pE} déterminées par les calculs à la rupture

considérant des arcs de spirale logarithmique (Talren, 2022).

Plusieurs valeurs d'angle de frottement, d'inclinaison de parement, de pente et d'obliquité de la poussée ou de la butée ont été étudiées.

Différentes intensités sismiques ont également été prises en compte. Les valeurs retenues sont présentées ci-après :

- 3 valeurs de Φ : 20°, 30°, 40 ;
- 3 valeurs de λ : -15°, 0°, 15 ;
- 3 valeurs de β : 0°, 15°, 30 ;
- 3 valeurs de δ/Φ : 0, 1/3, 2/3 (pour la poussée) et 0, -1/3, -2/3 (pour la butée) ;
- 3 valeurs de a_h , soit 6 valeurs de θ_{eq} : 0.255 rad, 0.188 rad, 0.110 rad (séisme pesant) et 0.339 rad, 0.230 rad, 0.119 rad (séisme allégeant).

Les terrains considérés sont uniquement pulvérulents : 243 cas ont été testés.

Les figures suivantes présentent en abscisse la valeur de K_{aE} déterminée par le calcul à la rupture en abscisse et la valeur de K_{aE} déterminée par la nouvelle approche en ordonnée ($K_E = K_r i_g$).

Les Figure 3 et Figure 4 montrent une bonne corrélation entre les deux approches pour les poussées. On note une légère surestimation de l'approche avec le coefficient i_g pour les cas où le coefficient de poussée sismique K_{aE} est supérieur à 1, les cas présentant une valeur élevée pour l'inclinaison du parement ou une forte rotation équivalente.

Les Figure 5 et Figure 6 montrent une bonne corrélation entre les deux approches pour les butées. On note une légère sous-estimation de la butée par l'approche avec le coefficient i_g pour les cas où le coefficient sismique K_{pE} de butée est élevé (supérieur à 10).

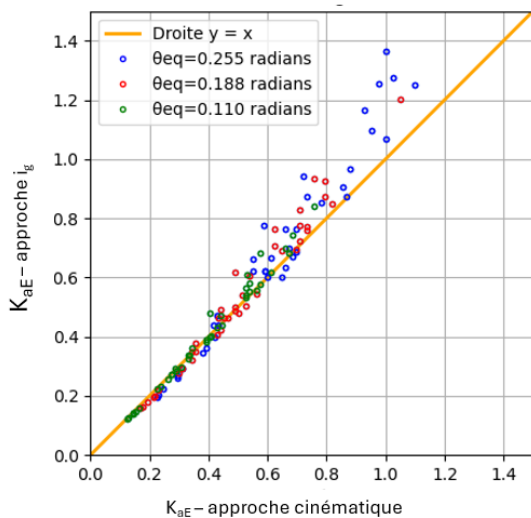


Figure 3 : Comparaison de la valeur de K_{aE} déterminée par le calcul à la rupture (abscisse) et par l'approche i_g (ordonnée) - Séisme pesant.

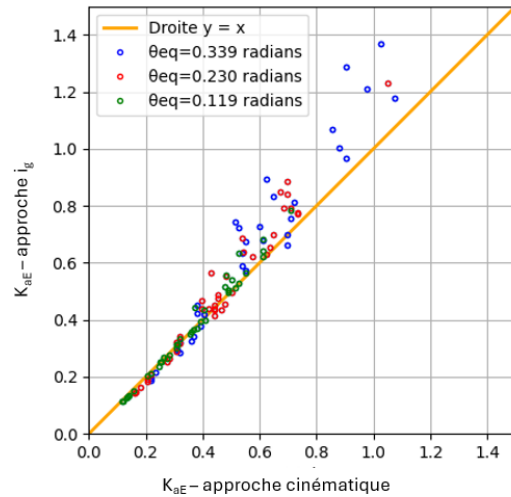


Figure 4 : Comparaison de la valeur de K_{aE} déterminée par le calcul à la rupture (abscisse) et par l'approche i_g (ordonnée) - Séisme allégeant.

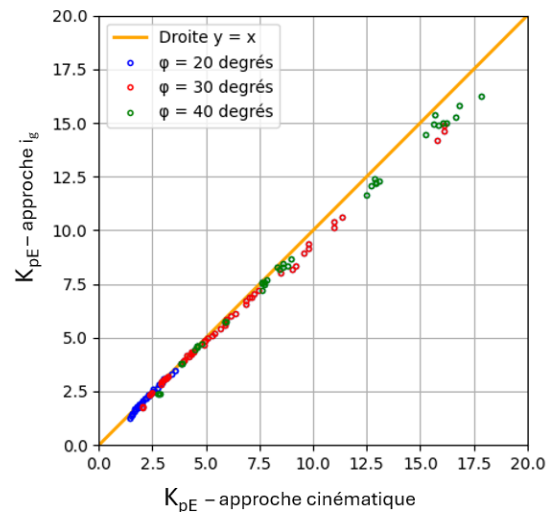


Figure 5 : Comparaison de la valeur de K_{pE} déterminée par le calcul à la rupture (abscisse) et par l'approche i_g (ordonnée) - Séisme pesant.

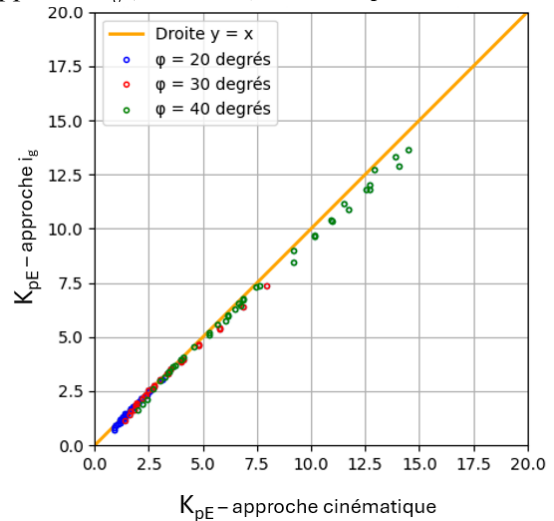


Figure 6 : Comparaison de la valeur de K_{pE} déterminée par le calcul à la rupture (abscisse) et par l'approche i_g (ordonnée) - Séisme allégeant.

Les écarts constatés (surestimation de la poussée, et sous-estimation de la butée) sont cohérents avec les principes des approches de calculs. La méthode i_g approche le résultat « par l'intérieur » comme elle corrige les valeurs de Caquot et Kerisel qui sont établis selon le format de l'approche statique par l'intérieur alors que la méthode de calcul à la rupture

approche le résultat « par l'extérieur » étant donné les hypothèses qui la sous-tendent. La Figure 7 indique comment classer les différentes méthodes disponibles pour des états de poussée et de butée tant en conditions statiques que sismiques.

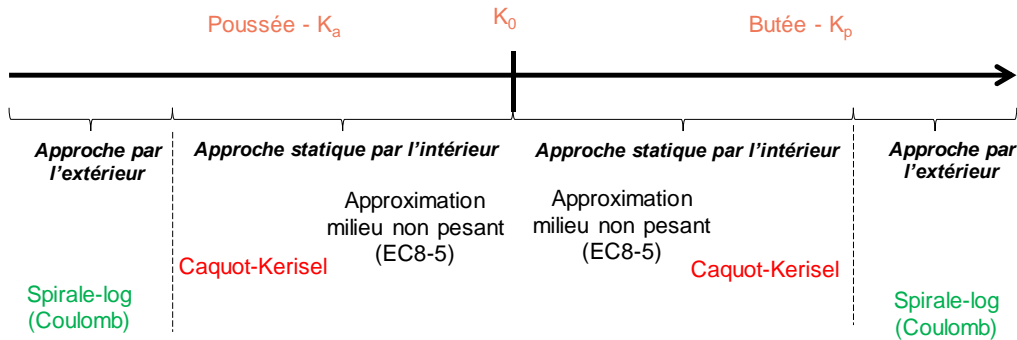


Figure 7 : Etat limite de poussée / butée (source : document interne Terrasol)

4 EFFETS DE LA COMPOSANTE VERTICALE DE L'ACCELERATION

Dans le cadre de l'approche de la norme EN 1998-5 (CEN, 2024), la composante a_v du séisme est considérée nulle. L'approche i_g permet de prendre en compte des composantes verticale a_v non-nulles (séisme pesant ou allégeant).

4.1 En poussée

La Figure 8 présente les valeurs de $i_{g,a}$ (poussée) pour le cas suivant : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 2/3 \Phi$, $\Phi = 30^\circ$. Trois courbes sont présentées : une prenant en compte une accélération verticale positive a_{v+} (séisme pesant), une prenant en compte une accélération verticale nulle $a_{v=0}$, et enfin une prenant en compte une accélération verticale négative a_{v-} (séisme allégeant).

Les résultats sont présentés en fonction de l'accélération horizontale. Dans le cadre de ce travail la relation suivante entre la composante verticale et la composante horizontale est retenue : $a_v = \pm a_h/2$.

Pour une accélération horizontale $a_h < 3 \text{ m/s}^2$ (ce qui couvre la majorité des cas en France métropolitaine), l'écart relatif entre les courbes a_{v+} et $a_{v=0}$ est inférieur à 5%. Il en est de même pour l'écart relatif entre a_{v-} et $a_{v=0}$. Cette approche peut donc être mise en place avec une bonne précision pour le calcul des murs de soutènement en situation sismique. Pour une accélération horizontale importante ($a_h > 4 \text{ m/s}^2$), l'écart relatif entre les courbes a_{v+} (ou a_{v-}) et $a_{v=0}$ peut atteindre 15%.

4.2 En butée

La Figure 9 présente les valeurs de $i_{g,p}$ (butée) pour le cas suivant : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = -2/3 \Phi$, $\Phi = 30^\circ$. Trois courbes sont également présentées : une avec a_{v+} (séisme pesant), une avec $a_{v=0}$ et enfin, une avec a_{v-} (séisme allégeant).

Dans le cas de la butée, les écarts constatés entre les courbes a_{v+} (ou a_{v-}) et la courbe $a_{v=0}$ sont bien supérieurs à ceux constatés en poussée. L'ordre de grandeur des écarts est présenté dans le Tableau 1 : les écarts augmentent avec l'accélération horizontale a_h , jusqu'à 20% pour les séismes moyens ($a_h < 3 \text{ m/s}^2$), et plus importants pour les séismes forts ($a_h > 3 \text{ m/s}^2$).

Ce résultat met en évidence la limite de l'hypothèse d'une accélération verticale nulle $a_v=0$ pour le calcul de la butée sismique. Dans le cadre d'un projet où la précision est exigée (projets d'enjeu important, aléas sismiques forts), cette approche avec le coefficient i_g , ou toute approche dérivée du principe de rotation, montre qu'il n'est pas sécuritaire de retenir une composante verticale nulle pour l'accélération sismique.

En pratique, pour les calculs des écrans de soutènement (ouvrages impliquant la butée pour sa stabilité et sa résistance), l'hypothèse avec une composante verticale de l'accélération a_v non-nulle devrait être systématiquement considérée.

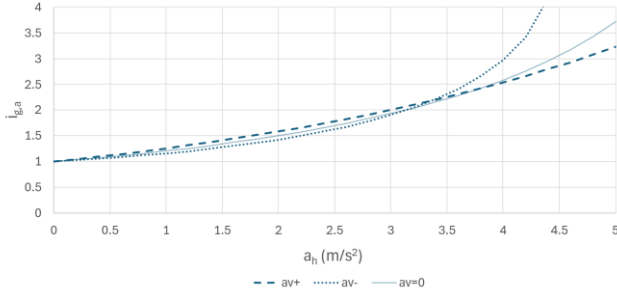


Figure 8 : Poussée - Valeur de $i_{g,a}$ en fonction de l'accélération a_h pour 3 valeurs de a_v . Cas : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 2/3 \Phi$, $\Phi = 30^\circ$.

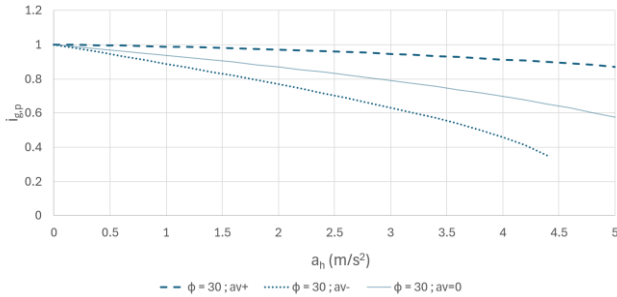


Figure 9 : Butée - Valeur de $i_{g,p}$ en fonction de l'accélération a_h pour 3 valeurs de a_v . Cas : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = -2/3 \Phi$, $\Phi = 30^\circ$.

Tableau 1 : : Butée - Écart relatif entre les courbes a_{v+} et $a_{v=0}$ ou entre les courbes a_{v-} et $a_{v=0}$ en fonction de l'accélération horizontale a_h

	$ a_{v=0} - a_{v+} / a_{v=0}$	$ a_{v=0} - a_{v-} / a_{v=0}$
$a_h = 1 \text{ m/s}^2$	5%	5%
$a_h = 2 \text{ m/s}^2$	12%	12%
$a_h = 3 \text{ m/s}^2$	20%	20%
$a_h = 4 \text{ m/s}^2$	31%	34%

5 VARIATION DES COEFFICIENTS I_G

5.1 En poussée

Dans le cas de la poussée dynamique, le séisme augmente la valeur de la poussée statique. Différents facteurs influent sur la valeur de $i_{g,a}$, et sont listés ci-après avec leurs degrés d'importance :

- l'intensité du séisme (a_h , θ_{eq}) : les variations de $i_{g,a}$ sont importantes (Figure 10, Figure 11) ;
- l'accélération verticale (a_v) : les variations de $i_{g,a}$ sont faibles sauf pour de très fortes accélérations (Figure 8) ;
- la pente du talus (β) : les variations de $i_{g,a}$ sont importantes (Figure 11) ;
- l'angle de frottement (Φ) : les variations de $i_{g,a}$ sont faibles (Figure 10) ;
- la valeur de $i_{g,a}$ est, par construction, indépendante de l'inclinaison du parement (λ) et de l'obliquité de la poussée (δ / Φ) (Figure 12).

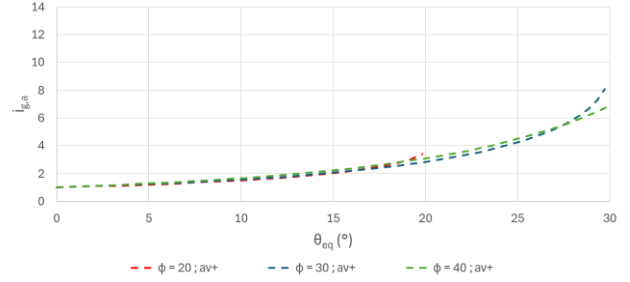


Figure 10 : Poussée - Variation de $i_{g,a}$ en fonction de l'angle de rotation équivalent θ_{eq} et de l'angle de frottement Φ du matériau - Cas : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 2/3 \Phi$.

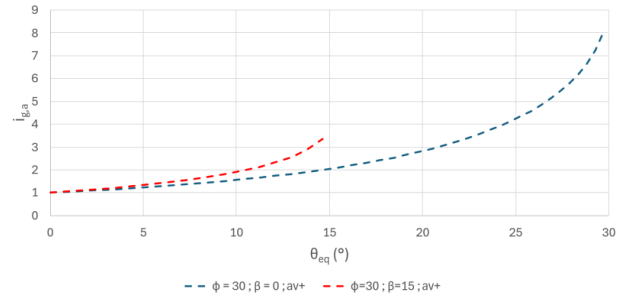


Figure 11 : Poussée - Variation de $i_{g,a}$ en fonction de l'angle de rotation équivalente θ_{eq} et de la pente β du talus. Cas : $\lambda = 0^\circ$, $\delta = 2/3 \Phi$, $\Phi = 30^\circ$.

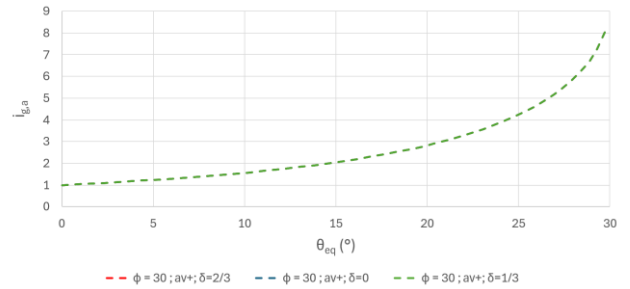


Figure 12 : Poussée - Variation de $i_{g,a}$ en fonction de l'angle de rotation équivalente θ_{eq} et de l'obliquité δ de la poussée - Cas : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\Phi = 30^\circ$.

5.2 En butée

Dans le cas de la butée dynamique, le séisme diminue la valeur du coefficient de butée. Différents facteurs influent sur la valeur de $i_{g,p}$ et sont listés ci-après avec leurs degrés d'importance :

- l'intensité du séisme (a_h , θ) : les variations de $i_{g,p}$ sont importantes (Figure 13)
- l'accélération verticale (a_v) : les variations de $i_{g,p}$ sont importantes quelle que soit l'accélération (Figure 9) ;
- l'angle de frottement (Φ) : les variations de $i_{g,p}$ sont importantes (Figure 13) ;
- la pente du talus (β) : seul le cas $\beta=0$ est étudié en butée (cas le plus courant) ;
- la valeur de $i_{g,p}$ est, par construction, indépendante de l'inclinaison du parement (λ) et de l'obliquité de la poussée (δ / Φ) (Figure 14).

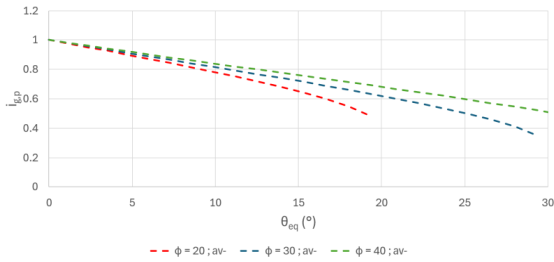


Figure 13 : Butée - Variation de $i_{g,p}$ en fonction de l'angle de rotation équivalente θ_{eq} et de l'angle de frottement Φ du matériau - Cas : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 2/3 \Phi$.

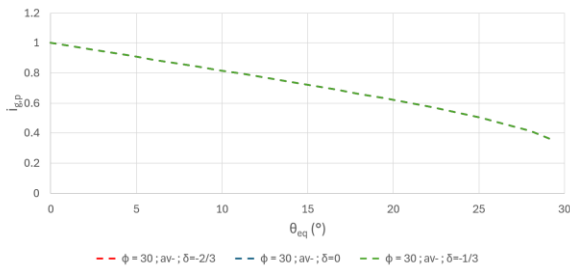


Figure 14 : Butée - Variation de $i_{g,p}$ en fonction de l'angle de rotation équivalente θ_{eq} et de l'obliquité δ de la butée - Cas : $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\Phi = 30^\circ$.

6 CONCLUSION

La nouvelle approche proposée permet de calculer la poussée ou la butée sismique à partir de la poussée ou de la butée statique. Facile d'utilisation, elle peut être utilisée directement à partir d'abaques (annexe §8 ci-après).

Elle permet d'élargir l'approche de la norme Eurocode 8 EN 1998-5 (CEN, 2024) en prenant en compte :

- l'inclinaison du parement λ : application possible pour les murs anciens en maçonnerie ou les murs cellulaires) ;
- l'accélération verticale du séisme a_v , ce qui est nécessaire voire indispensable pour :
 - les projets à forts enjeux ou dans une zone d'aléa sismique fort ;
 - les ouvrages de soutènement pour le calcul de la butée sismique.

La prise en compte de la cohésion peut constituer un développement futur de ce travail. En effet, il est possible de déterminer K_{ac} à partir de K_{ay} intégrant ou non les conditions sismiques.

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CEN (2024) EN 1998-5. Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques.

Caquot, A. (1934). *Équilibre des massifs à frottement interne – Stabilité des terres pulvérulentes ou cohérentes*, Gauthier-Villars, Paris, France.

Caquot, A and Kerisel, J. (1949). *Traité de Mécanique des Sols, 2^{nde} Edition de l'ouvrage : Equilibre des massifs à frottement interne – Stabilité des terres pulvérulentes ou cohérentes*, Gauthier-Villars, Paris, France.

Kerisel, J. et Absi, E. (1990). *Tables de poussée et de butée des terres*. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

Lancellotta, R. (2002). Analytical solution of passive earth pressure. *Géotechnique* 52(8): 617-619.

Lancellotta, R. (2007). Lower-bound approach for seismic passive earth resistance. *Géotechnique* 57(3): 319-321.

L'Herminier, R. and Absi, E. (1962). *Equilibre limite d'un coin dans un milieu non pesant – Tables numériques*, Eyrolles, Paris, France.

Salençon, J. (1974). *Théorie de la plasticité pour les applications à la mécanique des sols*, Eyrolles, Paris, France.

Seed HB, Whitman, R.V. (1970). Design of earth retaining structures for dynamic loads, *Proceedings of specialty conference on lateral stresses in the ground and design of earth retaining structures*, ASCE, Ithaca, New York, 103-147.

Talren (2022) Manuel d'utilisation, Terrasol, Paris.

Nous proposons de retenir les abaques ci-dessous pour les valeurs de $i_{g,a}$ et $i_{g,p}$ des cas les plus courant.

8 ANNEXE

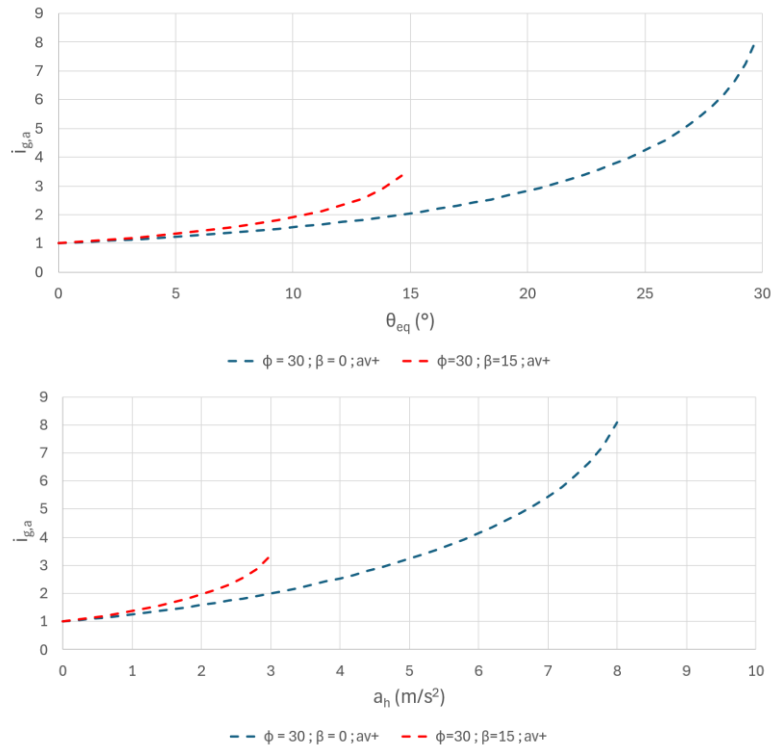


Figure 15 : Courbes $i_{g,a}(\theta_{eq})$ ou $i_{g,a}(a_h)$ pour $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$ et 15° , $\varphi = 20^\circ$, 30° et 40° (différences négligeables), $a_v > 0$ (séisme pesant, légèrement plus défavorable)

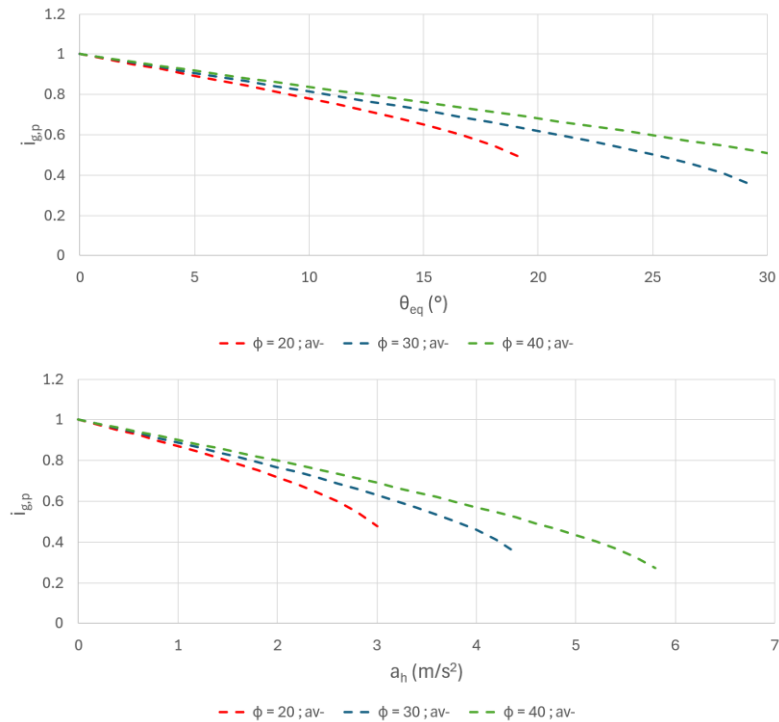


Figure 16 : Courbes $i_{g,p}(\theta_{eq})$ ou $i_{g,p}(a_h)$ pour $\lambda = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\varphi = 20^\circ$, 30° et 40° , $a_v < 0$ (séisme allégeant, plus défavorable)