

# Détermination des diagrammes d'interaction P–M pour semelles sur sol renforcé : comparaison des méthodes classiques et approche Winkler plastique

## Determination of P–M interaction diagrams for shallow foundations on improved ground: comparison of classical methods and a plastic Winkler approach

Léo QUIRIN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Keller Enterprise, France

\* leo.quirin@keller.com

**RESUME** : Cet article présente une procédure robuste de détermination des diagrammes d'interaction P–M (charge verticale–moment) pour semelles rigides reposant sur un sol renforcé (via inclusions rigides ou colonnes ballastées par exemple). Les approches usuelles (aire comprimée de Meyerhof, méthodes simplifiée par ratio d'aire de type «  $i_e$  » (cf. NF P 94 261)) sont rappelées et discutées en termes d'hypothèses (répartition uniforme des contraintes, découplage des mécanismes, prise en compte simplifiée des inclusions/colonnes ballastées). Une méthode numérique alternative est ensuite proposée, fondée sur un modèle de sol de type Winkler à comportement élasto-plastique parfait (cap de portance  $q_{max}$ , décollement en traction) et sur une résolution itérative de l'équilibre d'un corps rigide. L'enveloppe P–M est obtenue par recherche dichotomique de la charge limite pour une excentricité donnée. Une étude comparative sur un cas de semelle carrée 2,2 m × 2,2 m renforcée par 3 ou 4 inclusions montre que l'approche Winkler plastique restitue naturellement la transition vers des états partiellement porteurs (décollement), évite le « couperet »  $P=0$  à  $e=L/2$  des méthodes d'aire efficace et fournit des diagrammes continus, directement exploitables pour le dimensionnement.

**ABSTRACT**: This article presents a robust procedure for determining P–M (vertical load–moment) interaction diagrams for rigid footings resting on reinforced soil (for example with rigid inclusions or stone columns). The usual approaches (Meyerhof's effective area, simplified methods using an 'ie' type area ratio) are reviewed and discussed in terms of assumptions (uniform stress distribution, decoupling of mechanisms, simplified consideration of inclusions/stone columns). An alternative numerical method is then proposed, based on a Winkler-type soil model with perfect elasto-plastic behavior (bearing capacity  $q_{max}$ , tensile separation) and on an iterative resolution of the equilibrium of a rigid body. The P–M envelope is obtained by dichotomous search for the limit load for a given eccentricity. A comparative study on a 2.2 m × 2.2 m square footing reinforced by 3 or 4 inclusions shows that the plastic Winkler approach naturally reproduces the transition to partially bearing states (lift-off), avoids the  $P=0$  at  $e=L/2$  'cut-off' of effective area methods, and provides continuous diagrams that can be directly used for design purposes.

**Mots-clés** : semelle ; excentricité ; diagramme d'interaction ; Meyerhof ; Winkler plastique

## 1 INTRODUCTION

Les diagrammes d'interaction  $P-M$  décrivent, pour une semelle supposée rigide, les combinaisons admissibles entre la charge verticale  $P$  et les moments  $M_x$  et  $M_y$ , ou de manière équivalente les excentricités  $e_x = M_y/P$  et  $e_y = M_x/P$ . Ils constituent un outil de synthèse pour l'évaluation de la portance ultime et de la stabilité au renversement des fondations superficielles, en particulier lorsque le support présente des hétérogénéités marquées (couches, renforcement discret) ou un comportement de contact partiel.

Dans le cas d'un sol renforcé (inclusions rigides, colonnes ballastées, etc.), le dimensionnement doit pouvoir rendre compte simultanément : (i) d'une répartition de contraintes non uniforme sous charge excentrée, (ii) de l'apparition de zones en décollement (traction non admissible), et (iii) des contraintes équilibrées par le sol et les inclusions tenant compte de leur limite de plasticité. Les méthodes usuelles, fondées sur l'aire effective (Meyerhof) ou sur des approches de type ratio d'aire  $i_e$ , sont attractives par leur simplicité mais reposent sur des hypothèses fortes (contrainte "moyenne", réduction essentiellement géométrique) et peuvent conduire à des discontinuités ou à une prise en compte trop simplifiée du renforcement discret. À l'inverse, les modèles numériques complets (éléments finis) deviennent coûteux dès lors qu'on cherche à produire des enveloppes  $P-M$  sur de larges domaines d'excentricité et/ou pour des études paramétriques.

Dans ce contexte, l'objectif de l'article est double : (1) rappeler et discuter les approches classiques (Meyerhof,  $i_e$ ) au regard de leurs hypothèses, et (2) proposer une alternative numérique légère, fondée sur un modèle de contact de type Winkler à comportement élasto-plastique parfait, permettant de produire des enveloppes  $P-M$  continues et physiquement cohérentes en présence d'hétérogénéités et de décollement.

## 2 NOTATIONS ET CADRE DE CALCUL

On considère une semelle rectangulaire de dimensions  $L \times B$ , supposée rigide. La charge verticale  $P$  est appliquée au point  $(e_x, e_y)$  par rapport au centre géométrique, générant les moments  $M_y = P \cdot e_x$  et  $M_x = P \cdot e_y$ . Le sol est représenté par des zones (sol naturel, colonnes ballastées, inclusions rigides) caractérisées par une rigidité de réaction verticale  $k$  et une contrainte

limite  $q_{\max}$ . Les paramètres peuvent varier spatialement afin de représenter le renforcement (zones circulaires) au sein d'une zone de sol (zone rectangulaire).

Le diagramme  $P-M_y$  (respectivement  $P-M_x$ ) est obtenu en faisant varier  $e_x$  (respectivement  $e_y$ ) dans l'intervalle  $[-L/2 ; +L/2]$  (respectivement  $[-B/2 ; +B/2]$ ) et en déterminant, pour chaque excentricité, la charge limite  $P_{\text{ult}}(e)$  puis le moment ultime  $M_{\text{ult}} = P_{\text{ult}} \cdot e$ .

## 3 TECHNIQUES CLASSIQUES

### 3.1 Méthode de Meyerhof (aire efficace)

La méthode de Meyerhof assimile l'effet de l'excentricité à une réduction de l'aire portante. Pour une semelle rectangulaire, l'aire effective est définie par les dimensions :  $L_{\text{eff}} = L - 2|e_x|$  et  $B_{\text{eff}} = B - 2|e_y|$ . La portance ultime est alors calculée sur l'aire effective  $A_{\text{eff}} = L_{\text{eff}} \cdot B_{\text{eff}}$ , avec une contrainte ultime uniforme. Dans le cas d'un sol renforcé, une extension pratique consiste à sommer les contributions du sol et des éléments de renforcement présentes dans l'aire efficace :  $P_{\text{ult}} = q_{\text{ult,sol}} \cdot A_{\text{eff,sol}} + \sum q_{\text{ult},i} \cdot A_{i,\text{actif}}$ , où  $A_{i,\text{actif}}$  est l'aire de l'élément de renforcement intersectant l'aire effective (approximation « on/off » (un élément de renforcement est soit considérée totalement efficace, soit ignorée, selon sa position géométrique par rapport à la ligne neutre fictive) ou intersection géométrique).

Avantages : simplicité, calcul instantané, interprétation directe via l'excentricité. Inconvénients : (i) discontinuité forte lorsque  $L_{\text{eff}}$  ou  $B_{\text{eff}}$  tend vers zéro ( $P_{\text{ult}} \rightarrow 0$  à  $e=L/2$ ), (ii) hypothèse de contrainte uniforme sur  $A_{\text{eff}}$ , (iii) prise en compte des éléments de renforcement dépendante d'une règle de sélection (tout ou partie) et sensible à la géométrie, (iv) difficulté à représenter un décollement progressif ou une redistribution plastifiée.

### 3.2 Méthode simplifiée par ratio d'aire ( $i_e$ )

Une variante courante consiste à estimer la réduction de portance par un facteur  $i_e$  égal au ratio d'aire efficace sur aire totale :  $i_e = A_{\text{eff}}/A = (L_{\text{eff}} \cdot B_{\text{eff}})/(L \cdot B)$ . La charge limite est alors  $P_{\text{ult}}(e) = P_{\text{ult}}(0) \cdot i_e$ , où  $P_{\text{ult}}(0)$  est la capacité centrée (sol + éléments de renforcement). Cette approche revient à supposer que l'excentricité n'affecte que l'aire portante mobilisable, sans redistribution des contraintes.

En l'absence d'éléments de renforcements cette méthode revient exactement à la méthode de Meyerhof puisque l'aire effective est calculée de la même façon. La différence apparaît lorsque des éléments de renforcement sont présents, car contrairement à la méthode de Meyerhof, leur position n'influence plus du tout le calcul de la portance.

Avantages : mise en œuvre extrêmement rapide, continuité tant que  $A_{\text{eff}} > 0$ . Inconvénients : (i) même « couperet » à  $e=L/2$ , (ii) absence de distinction sol/éléments de renforcement dans la zone active, (iii) tendance à surestimer ou sous-estimer la portance selon la localisation des éléments de renforcement et la rigidité relative.

### 3.3 Méthode de Navier

La méthode de Navier permet de déterminer une surface comprimée en supposant que le contact sol-semelle n'accepte aucune traction et peut être aussi grand que possible en compression. Cette méthode n'est pas optimale dans la mesure où elle suppose le contact sol-semelle élastique, ce qui conduit aux mêmes limitations que précédemment même si la surface comprimée est plus importante que la surface effective. Dans le cas d'un moment  $M_x$  dans une seule direction, pour une semelle filante, si l'excentrement  $e_x$  est supérieur à  $B/6$ , la surface comprimée est  $1,5(B - 2e_x)$  alors que la surface effective est  $(B - 2e_x)$ . La nouvelle version de la norme NF P 94-261 compatible avec la seconde génération d'Eurocode 7 apporte des compléments quant à la définition et au calcul de ces deux types de surface.

## 4 APPROCHES WINKLER : ELASTIQUE ET PLASTIQUE

### 4.1 Winkler élastique avec décollement

Le modèle de Winkler représente le sol par un ensemble de ressorts verticaux distribués sur l'emprise de la semelle, chaque point  $(x, y)$  étant associé à une raideur de réaction  $k(x, y)$ . Sous l'hypothèse de

rigidité de la semelle, le champ de tassement est affiné et s'écrit classiquement :

$$w(x, y) = w_0 + \theta_x y + \theta_y x$$

où  $w_0$  est l'enfoncement moyen et  $\theta_x, \theta_y$  les rotations de la semelle autour des axes  $x$  et  $y$  (convention cohérente avec le vecteur inconnu  $u = [w_0, \theta_x, \theta_y]^T$ ). Les contraintes élastiques locales sont alors données par :

$$q_{el}(x, y) = k(x, y) w(x, y)$$

Une condition de non-traction est imposée en annulant localement la contribution des ressorts lorsque la contrainte élastique devient négative (décollement), ce qui permet de décrire une surface comprimée compatible avec le contact. Cette formulation reste toutefois limitée à l'analyse "élastique" du contact : en l'absence de critère de rupture, elle ne permet pas de définir une portance ultime ni une enveloppe  $P-M$  à l'ELU. A ce stade, l'approche de Winkler est identique à celle de Navier.

### 4.2 Nouvelle approche : Winkler plastique (élasto-plastique parfait)

Pour produire directement une capacité ultime sous excentricité tout en conservant une complexité modérée, une extension élasto-plastique parfaite est introduite au niveau des ressorts. En compression, la contrainte est plafonnée par une capacité locale  $q_{\text{max}}(x, y)$  (sol et zones renforcées pouvant avoir des valeurs distinctes) ; en traction, la contrainte est nulle. Lorsqu'un point atteint  $q_{\text{max}}$ , il est déclaré plastifié : sa raideur tangentielle est annulée ( $k_{\text{active}} \rightarrow 0$ ) afin de permettre la redistribution des efforts vers les zones encore élastiques.

Pour une charge totale  $P$  appliquée avec excentricité  $(e_x, e_y)$ , l'équilibre global du corps rigide est formulé sous la forme d'un système  $3 \times 3$  :

$$A u = b \text{ avec } u = [w_0, \theta_x, \theta_y]^T$$

où  $b = [P_{\text{res}}, M_{x,\text{res}}, M_{y,\text{res}}]^T$  est le vecteur comprenant les efforts appliqués à la semelle puis les résultantes résiduelles après prise en compte des contributions déjà plastifiées, et où la matrice  $A$  est assemblée à partir des raideurs actives  $k_{\text{active}}$  et des coordonnées  $(x, y)$  de la grille (sur l'emprise de la semelle). Après résolution, on met à jour  $w(x, y)$  puis  $q(x, y)$  ; les points tels que  $q > q_{\text{max}}$  sont ajoutés à

l'ensemble plastifié, tandis que les points tels que  $q_{el} < 0$  sont mis en décollement (via  $k_{active} = 0$ ).

La procédure est itérative et converge lorsque (i) aucun nouveau point ne plastifie et (ii) aucun nouveau point ne passe en traction. Si, au cours du processus, la matrice  $A$  devient singulière alors que la charge résiduelle demeure significative, l'état est déclaré instable. Pour construire l'enveloppe  $P-M$ , on cherche ensuite la charge limite  $P_{ult}(e)$  associée à une excentricité donnée par une recherche dichotomique sur  $P$  (ordre de grandeur : 50 itérations), la stabilité de l'état final servant de critère pour l'acceptation de la charge testée ; le moment ultime s'en déduit via  $M_{ult} = P_{ult} \cdot e$ .

La Figure 1 résume l'algorithme de résolution Winkler plastique.

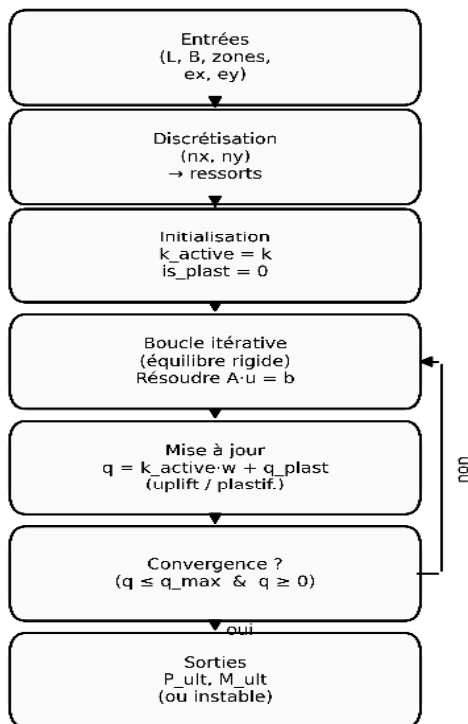


Figure 1 – Schéma de calcul de la charge limite par modèle Winkler élasto-plastique.

## 5 COMPARAISON DES METHODES ET DISCUSSION

Les trois approches (Meyerhof aire efficace, ratio d'aire  $i_e$ , Winkler plastique) ont été appliquées à un cas de référence inspiré d'un projet type : semelle carrée  $L=B=2,2$  m reposant sur un sol ( $k=10\ 000$  kN/m<sup>3</sup>,  $q_{max}=240$  kPa) renforcé par 3 ou 4 inclusions rigides (rayon 0,17 m,  $k=1\ 000\ 000$  kN/m<sup>3</sup>,  $q_{max}\approx 8044$  kPa). L'objectif est de visualiser l'apport supplémentaire de la modélisation de Winkler sur une disposition non

symétrique des inclusions rigides sous la semelle. La figure 2 détaille la position considérée des inclusions rigides. Les zones rouges présentent les zones d'inclusions rigides de forte rigidité surfacique et les zones bleue celles de sol ou la rigidité est moindre.

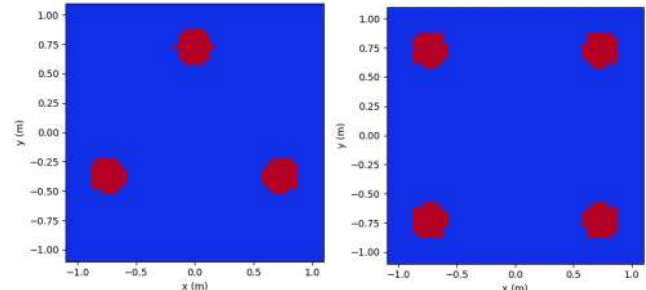


Figure 2 – Position considérée pour l'étude 3 et 4 inclusions rigides.

### 5.1 Cas de référence : sol homogène (sans inclusions)

On considère une semelle carrée rigide de dimensions  $L=B=2,20$  m reposant sur un sol homogène de portance uniforme  $q_{ult}=240$  kPa. Aucune inclusion et aucune amélioration locale ne sont prises en compte (matrice  $q_{ult}(x,y)$  constante). Dans ce contexte, les hypothèses des méthodes simplifiées coïncident avec le comportement du modèle de Winkler quand le sol est entièrement plastifié. En effet, dans cette configuration, la contrainte sous la semelle devient uniforme

#### 5.1.1 Calcul comparatif et équivalence des méthodes

Le calcul est mené pour plusieurs excentricités  $e$  (moment  $M=P \cdot e$ ). La figure 3 synthétise l'évolution de  $P_{lim}$  en fonction de l'excentricité (direction  $x$ ) : les trois approches donnent des résultats identiques aux erreurs numériques près, ce qui confirme que l'apport du Winkler plastique ne se manifeste pas dans un milieu parfaitement homogène.

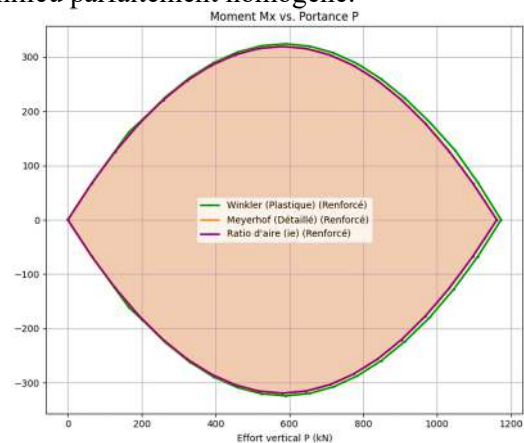


Figure 3 – Cas sol homogène : superposition des enveloppes  $P-My$  et  $P-Mx$  (équivalence des méthodes).

La figure 4 présente les iso-valeurs du rapport  $P_{ult}/P_0$  en fonction des excentremets  $x$  et  $y$ .

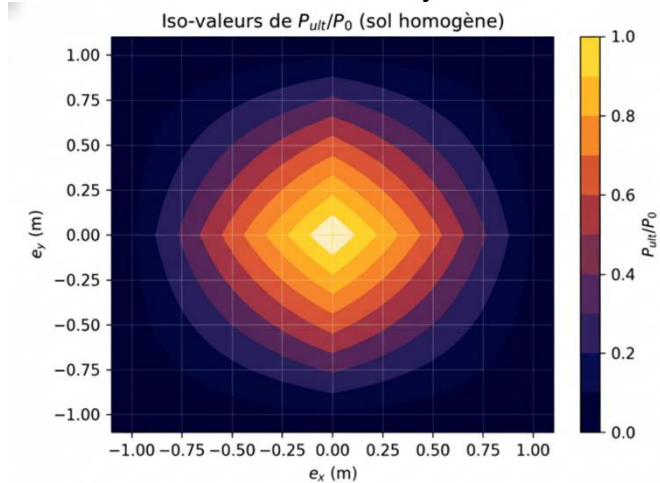


Figure 4 – Cas sol homogène : iso-valeurs de  $q_{ult}$  (répartition uniforme) et absence d'hétérogénéité.

### 5.1.2 Lecture physique

Dans le cas d'un sol homogène (aucun élément de renforcement), les trois approches considérées — Meyerhof, méthode de ratio d'aire «  $i_c$  » et Winkler plastique — conduisent à des résultats équivalents. En effet, la résistance est gouvernée par une contrainte limite uniforme et la réduction de la surface comprimée ne dépend que de la géométrie ( $e_x$ ,  $e_y$ ) : la redistribution locale des pressions n'apporte ni gain ni perte tant que le sol reste homogène.

### 5.2 Ajout des inclusions : divergence entre méthodes

Après le cas de référence « sol seul », on introduit une hétérogénéité sous la semelle (semelle  $2,2 \times 2,2$  m<sup>2</sup>) en considérant 3 ou 4 inclusions rigides (cf. §5). L'objectif est de mettre en évidence la limite des approches simplifiées, qui restent basées sur une répartition globale des efforts et ne représentent ni la redistribution locale des pressions, ni l'apparition de zones en décollement.

Dans le cas renforcé, les méthodes simplifiées conservent une réponse « moyenne » et peuvent devenir trop conservatrices ou au contraire non sécuritaires selon l'excentricité : elles ne permettent pas de rendre compte du report des charges vers les zones plus raides, ni la perte de contact sur la partie opposée.

Le Modèle de Winkler, au contraire, intègre la variabilité spatiale de la raideur ( $k$ ) et de la capacité locale ( $q_{q_{max}}$ ) ; il met en évidence un gain en charge centrée, puis une réduction progressive de ce gain lorsque les zones en décollement apparaissent et que la

plastification se concentre à proximité des bords : la capacité ultime n'est plus uniquement liée à une pression moyenne, mais à la manière dont les zones comprimées se déplacent et se concentrent à mesure que l'excentricité augmente. Le modèle permet (i) de suivre la fermeture/ouverture du contact, (ii) de localiser les zones en plastification et (iii) de tenir compte d'une contrainte limite  $q_{max}$  différente d'une zone à l'autre. Les figures 5 et 6 synthétisent, l'évolution de  $P_{lim}$  en fonction de l'excentricité (direction  $x$ ).

Pour la configuration 4 inclusions rigides la méthode de Meyerhof conduit à une forte sous-estimation de l'effort  $P_{ult}$  pour des faibles excentremets et au contraire à une surestimation de celle-ci pour de forts excentremets. La méthode de ratio d'aire  $i_c$  conduit quant à elle à une sous-estimation de l'effort  $P_{ult}$  dans la gamme des excentremets moyens.

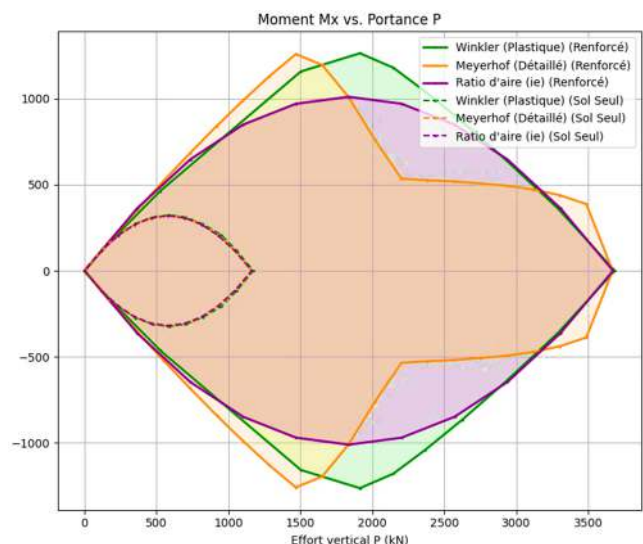


Figure 5 : Comparaison des enveloppes d'interaction  $P$ - $M$  (cas renforcé par 4 inclusions rigides). L'ajout des inclusions rigides met en évidence les écarts entre méthodes simplifiées et modèle de Winkler.

Pour la configuration 3 inclusions rigides on constate une forte anisotropie des résultats entre la direction X et Y. Dans la direction X, l'approche de Meyerhof conduit à une forte surestimation de la portance pour des faibles excentrement.

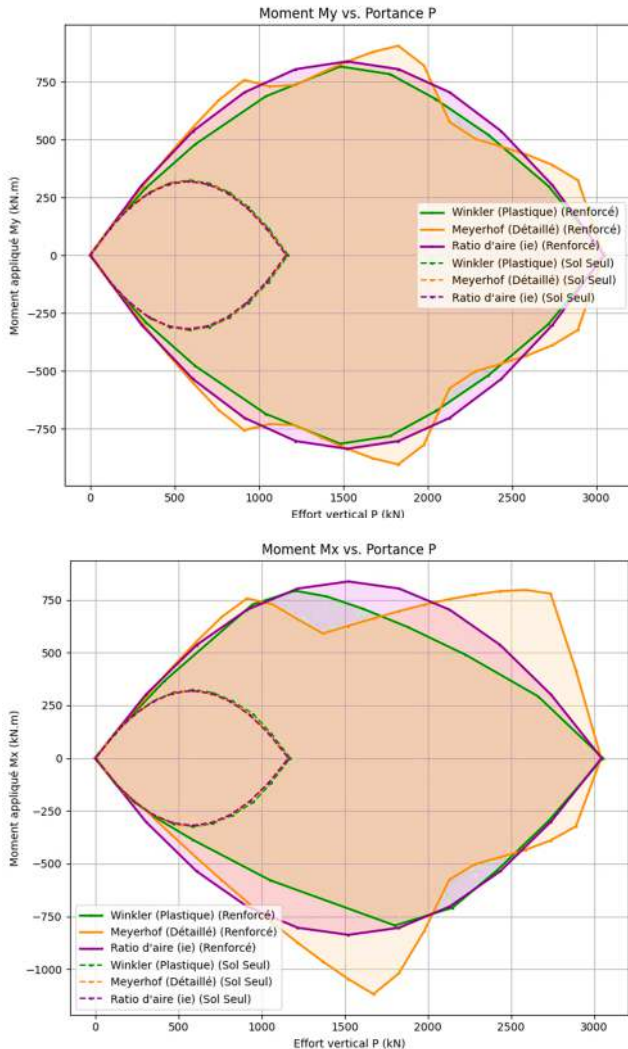


Figure 6 : Comparaison des enveloppes d'interaction P-M (cas renforcé par 3 inclusions rigides). L'ajout des inclusions rigides met en évidence les écarts entre méthodes simplifiées et modèle de Winkler.

### 5.3 Comparaison des surfaces comprimées ultimes

Lorsque le sol est sollicité à proximité de sa capacité ultime, le modèle Winkler plastique permet de visualiser la surface comprimée ultime (zone en contact effectif,  $q > 0$ ) au sein de l'emprise de la semelle. Dans le cas d'un sol non renforcé celle-ci reprend la forme exacte de la surface comprimée de Meyerhof. La Figure 7 compare cette zone pour (a) un sol seul, (b) un sol renforcé par 4 inclusions et (c) un sol renforcé par 3 inclusions, en condition « sol à la rupture » ( $P \approx P_{ult}$ ,  $e_x = e_y = 0,55$ ). Dans le cas du sol

seul, la surface comprimée se réduit conformément à la notion d'aire efficace associée aux charges excentrées. La contrainte limite sous la semelle est uniforme et atteint 240 kPa sous toute sa partie comprimée. Avec inclusions, la zone de contact reste structurée par la présence des inclusions, ce qui traduit la redistribution des efforts et l'intérêt du ressort Winkler pour représenter un contact partiel et non uniforme.

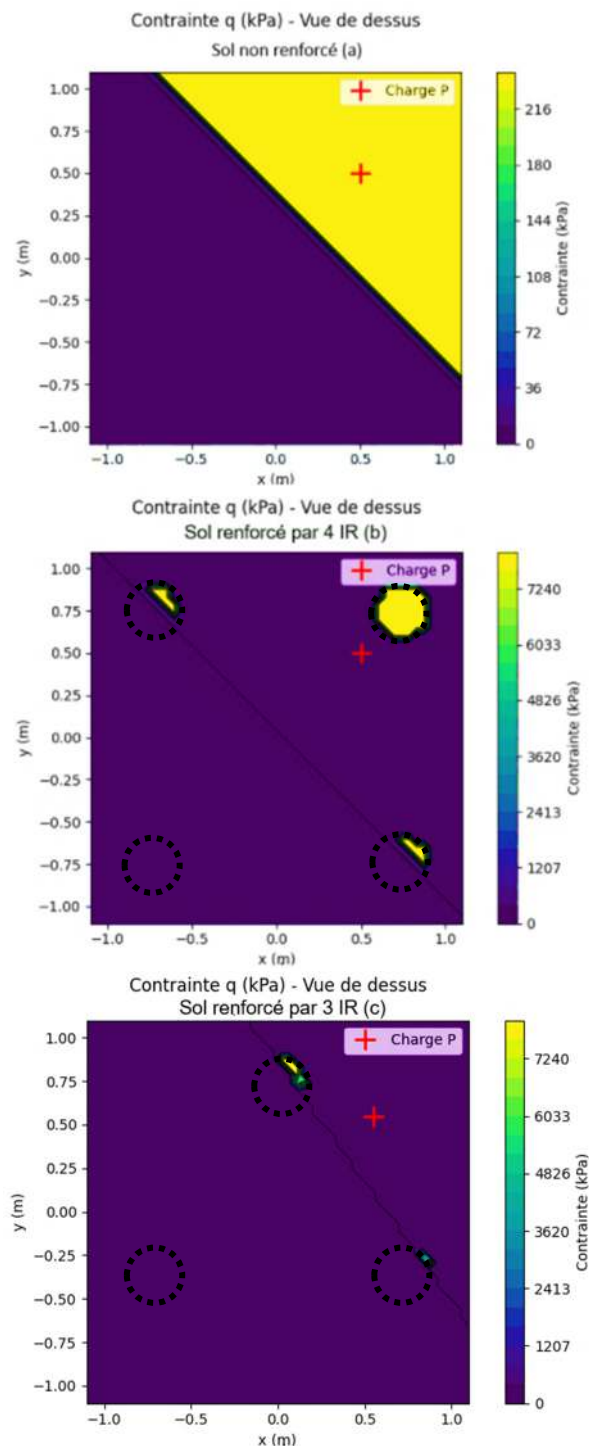


Figure 7 : Surface comprimée ( $q > 0$ ) à proximité de la charge ultime (sol à la rupture) : (a) sol seul,  $A_c \approx 1.71 \text{ m}^2$ ; (b) sol renforcé par 4 IR,  $A_c \approx 2.31 \text{ m}^2$ ; (c) sol

renforcé par 3 IR,  $A_c \approx 1.09 \text{ m}^2$ . Les cercles en tirets indiquent la position des inclusions.

La surface obtenue avec inclusions rigides est différente de celle obtenue sans. La méthode de Winkler est particulièrement efficace pour définir cette surface qui dépend des résistances localisées du sol et des éléments de renforcement. Elle met particulièrement bien en évidence le fait que si la charge sort de la zone des inclusions, celles-ci forment un axe de rotation autour duquel tourne la semelle.

#### 5.4 Sensibilité au maillage et à la discrétisation

Une étude de sensibilité au maillage ( $n_x, n_y$ ) montre que la solution Winkler converge rapidement : au-delà d'un pas de discrétisation compatible avec la taille caractéristique des zones hétérogènes, les variations sur  $P_{lim}$  restent faibles. Il est également possible de faire un premier calage du maillage afin d'obtenir les mêmes résultats entre les 3 méthodes de Meyerhof, de ratio d'aire  $i_e$  et Winkler dans le cas d'un sol non renforcé. Cette vérification est indispensable pour éviter d'interpréter des artefacts numériques (sur-concentration de contraintes) comme un effet physique.

#### 5.5 Aspects pratiques et limites d'emploi

Les méthodes simplifiées (Meyerhof et  $i_e$ ) restent utiles pour des vérifications rapides en sol homogène et lorsque les hypothèses de répartition de pression sont respectées. Néanmoins, leur emploi peut devenir risqué dès que l'on s'éloigne de ce cadre : hétérogénéités marquées, décollement partiel, plastification localisée ou interaction forte fondation-renforcement.

#### 5.6 Winkler 3D : surface d'interaction P-M<sub>x</sub>-M<sub>y</sub> et coupes biaxiales

Il est possible d'étendre les calculs Winkler en 3D afin de tenir compte simultanément des deux directions ( $e_x$  et  $e_y$ ) et d'une portance variable  $q_{max}(x,y)$  sur toute la surface. Il permet ainsi de produire directement des enveloppes P-M<sub>x</sub>-M<sub>y</sub> cohérentes, y compris pour des configurations où les méthodes classiques deviennent difficiles à appliquer (chargements biaxiaux, zones renforcées non uniformes, décollement anisotrope). Cette capacité à représenter finement la redistribution spatiale des pressions fait du Winkler 3D un outil particulièrement puissant pour analyser et dimensionner des fondations sur sol renforcé.

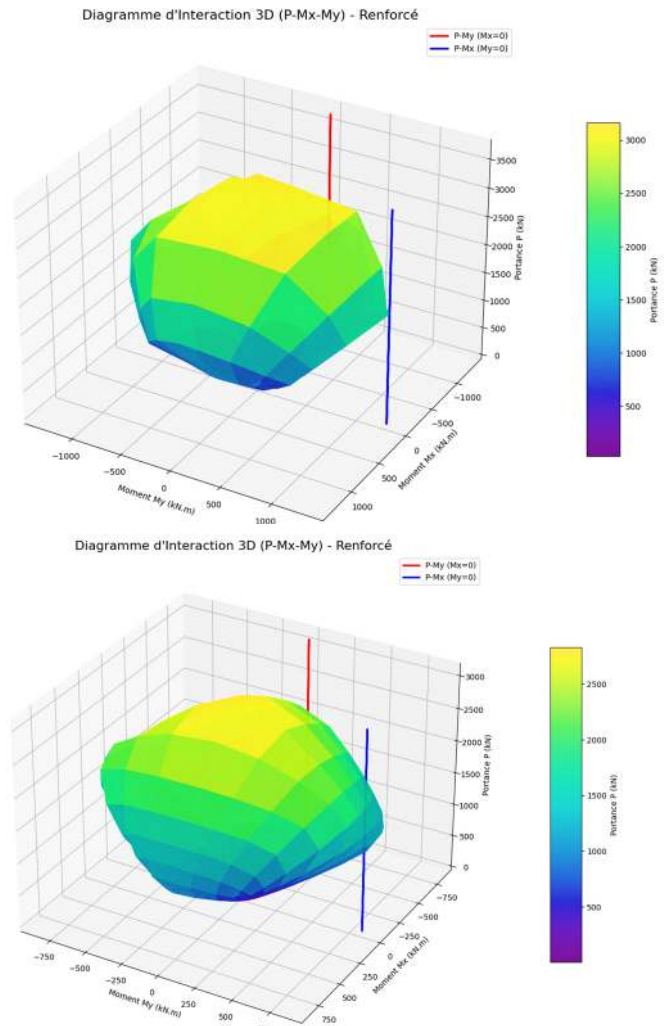


Figure 8 – Winkler 3D : surface d'interaction P-M<sub>x</sub>-M<sub>y</sub> dans le cas 4 et 3 inclusions rigides

## 6 FACTEURS DE SECURITE ET EXPLOITATION DES ENVELOPPES ULTIMES

Les enveloppes ultimes  $P - M_x$  et  $P - M_y$  (et, plus généralement, la surface d'interaction  $P - M_x - M_y$  obtenue par Winkler 3D) permettent d'introduire naturellement un facteur de sécurité global vis-à-vis de la rupture. Une approche pratique consiste à appliquer directement sur chaque zone (sol, inclusion rigide/colonne ballastées) un facteur de sécurité partiel puis de construire le diagramme de portance de cette façon. Les diagrammes obtenus sont alors directement des diagrammes ELS ou ELU.

## 7 CONCLUSION

Conclusion — Le cas « sol seul » confirme l'équivalence des trois méthodes et sert de base de validation. L'ajout d'éléments de renforcement met ensuite en évidence les limites des approches simplifiées : elles ne captent pas la variabilité spatiale de la portance ni les mécanismes de redistribution et de décollement. Le Winkler plastique (et a fortiori le Winkler 3D) permet au contraire de suivre ces phénomènes et fournit des enveloppes P-M plus représentatives des situations réelles.

Dans la pratique, l'usage des méthodes simplifiées doit donc être accompagné de précautions, notamment :

- hypothèse implicite d'un support homogène (ou d'un renforcement « continu ») : elle masque les effets de discrétisation des éléments de renforcement et les contrastes de rigidité/portance sol- éléments de renforcement ;

- absence de prise en compte de la position des éléments de renforcement par rapport aux zones comprimées : selon l'excentricité, la méthode peut surestimer ou sous-estimer la contribution réelle des éléments de renforcement ;

- représentation purement géométrique de la réduction de surface : elle ne décrit ni la redistribution des contraintes, ni la plastification progressive, ni les décollements locaux ;

- difficulté à traiter des situations biaxiales et/ou des configurations hétérogènes (couches, éléments de renforcement), pour lesquelles une approche de type Winkler plastique ou un modèle aux éléments finis s'avère plus robuste.

## REMERCIEMENTS

Merci à mes relecteurs, Sébastien BURLON ainsi que Serge LAMBERT, pour leurs commentaires et remarques pertinentes qui ont grandement contribué à la rédaction de cet article.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CEN (2004+A1:2013) EN 1997-1:2004+A1:2013, Eurocode 7 — Geotechnical design — Part 1: General rules. European Committee for Standardization, Brussels.
- Meyerhof, G.G. (1953) The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads. Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich.
- Hansen, J.B. (1970) A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geotechnical Institute, Bulletin No. 28.
- Vesic, A.S. (1973) Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99(SM1), 45–73.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G. (1996) Soil Mechanics in Engineering Practice (3rd ed.). Wiley.
- Bowles, J.E. (1996) Foundation Analysis and Design (5th ed.). McGraw-Hill.
- Salgado, R. (2008) The Engineering of Foundations. McGraw-Hill.
- Winkler, E. (1867) Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit. Prague.