

CALCUL D'UN PIEU EN TRACTION – EFFET DE CÔNE

TRACTION PILE CALCULATION – CÔNE EFFECT

Léo Quirin¹, ,

¹ Keller Fondations Spéciales, France

RÉSUMÉ – Le calcul des pieux devient particulièrement complexe lorsqu'il est nécessaire de prendre en compte la résistance à la traction. La norme NF P 94-262 décrit deux méthodes de dimensionnement que nous allons analyser et comparer afin de définir leur forces et faiblesses. Ces deux méthodes seront également comparées à une modélisation Plaxis 3D afin de déterminer si les mécanismes se développant dans le sol sont bien cohérents avec les deux méthodes décrites par la norme NF P 94 262.

ABSTRACT – Pile calculation is particularly complex when it's necessary to consider traction resistance. The NF P 94 262 describes two methods that we will analyze and compare to define their forces and weaknesses. These two methods will also be compared to a Plaxis 3D model to determine if the soil behavior is compatible with the two methods described in the NF P 94 262.

1. Introduction / Introduction

Les mécanismes mis en œuvre lors de la mobilisation d'un pieu en traction font intervenir le poids du sol mobilisé et le frottement sol/pieu. Le calcul de la portance d'un pieu doit donc bien prendre en compte chacun de ces deux paramètres et leur interaction. Le poids du volume de sol mobilisé devient une résistance qui doit être calculée afin de la comparer à l'effort de traction appliqué.

Cet article a pour objet d'étudier les méthodes de dimensionnement proposées par la norme NF P 94-262, de les comparer l'une avec l'autre, mais également avec une modélisation aux éléments finis afin de déterminer leurs pertinence et limitations. Nous détaillerons également quelques points particuliers comme le calcul d'un réseau de pieu et l'application de l'approche 2 sur les calculs à la rupture.

2. Méthode de dimensionnement décrit dans la NF P 94-262 / NF P 94 262 Design method

La méthode de dimensionnement de la norme NF P94-262/A1 Juillet 2018 présente deux approches qui peuvent être utilisées sans restrictions quel que soit la situation.

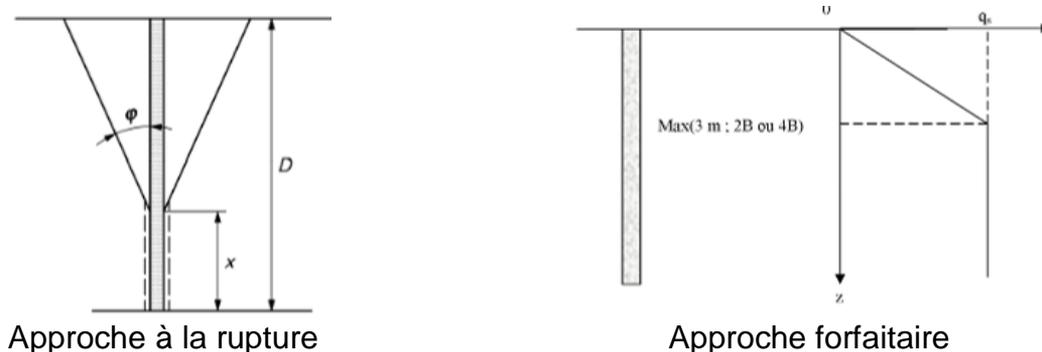


Figure 1 : approches de dimensionnement décrites dans la NF P94-262/A1 Juillet 2018

2.1. Interprétation de l'approche à la rupture

L'approche 1 consiste en un calcul de la résistance apportée par le poids du cône de sol mobilisé par le pieu lors de sa mise en traction. La valeur x (figure 1) est fixée par l'analyse de la profondeur à partir de laquelle de la résistance apportée par l'accroissement du poids du volume du cône devient supérieure à celle apportée par le nouveau frottement mobilisé.

2.2. Interprétation de l'approche forfaitaire

L'approche 2 bien plus simpliste suppose une augmentation linéaire du frottement à proximité de la surface. Cette approche est particulièrement peu dépendante du terrain notamment du niveau d'eau et de la densité des sols en place.

3. Comparaison entre l'approche à la rupture et un calcul Plaxis 3D / Comparison between rupture approach and Plaxis 3D

Afin de vérifier les formules de portance à la rupture, nous avons réalisé un comparatif avec un logiciel aux éléments finis, Plaxis 3D. Pour cela, un pieu isolé est modélisé à l'aide d'un élément « Embedded-beam » et un déplacement est imposé en tête de celui-ci. L'effort mobilisé par Plaxis afin de générer cette déformée est alors retenu.

Les sols sont modélisés en GHS (« Generalized Hardening Soil Model ») et le pieu considéré est un pieu réalisé à la tarière creuse $\phi 620$ mm. La nappe est considérée en surface.

Les résultats sont présentés sous forme de graphique comparatif entre la méthode de calcul à la rupture et les résultats Plaxis 3D. Nous présentons également la forme du terrain mobilisé dans Plaxis 3D lors du soulèvement du pieu. Celle-ci est directement représentative du comportement mixte de la résistance mobilisée, à la fois de part la résistance apportée par le poids de sol et de part le frottement le long du pieu.

3.1. Comparatif en portance

Nous considérerons les hypothèses suivantes :

Sol	p_l (MPa)	q_s (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)
Argile molle	0.5	51	5	20	17.0	8.0
Argile raide	1.0	62	15	20	17.0	8.0
Marne	1.0	133	30	30	20.0	10.0
Sable	0.8	75	0	30	17.0	9.5
Grave	2.0	130	0	38	19.0	11.5

Tableau 1 : caractéristiques considérées

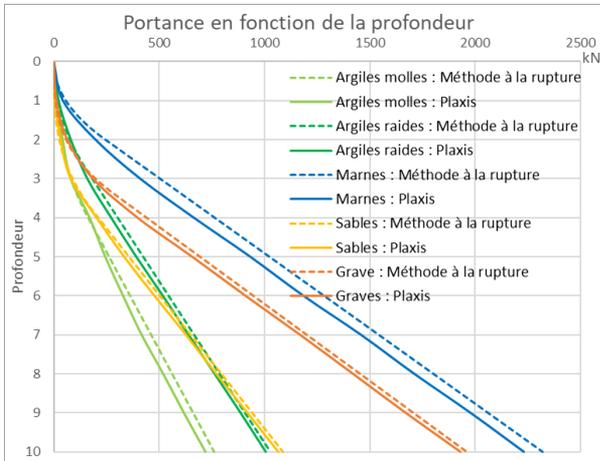


Figure 2 : Résultats comparatifs

Les calculs Plaxis 3D montrent une correspondance quasi parfaite avec la méthode à la rupture pour l'ensemble des types de terrains testés : l'approche à la rupture semble très réaliste et peut donc être considérée comme une approche de référence.

3.2. Comparatif de la mobilisation des terrains

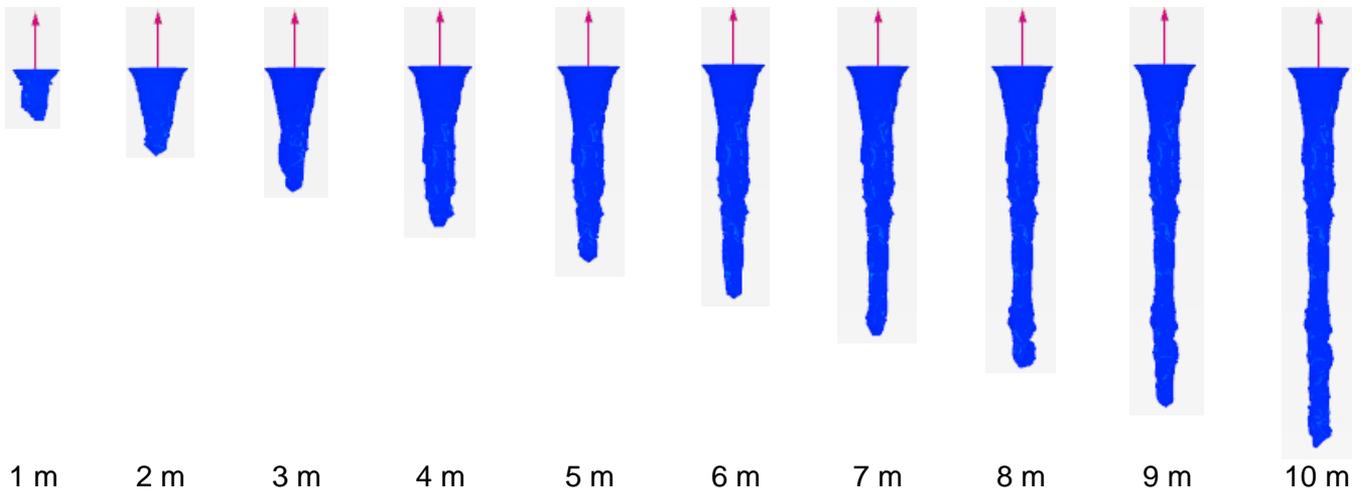


Figure 3 : déformée du sol autour du pieu avec la profondeur du pieu dans le cas d'une argile molle

pl (MPa)	qs (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)
0.5	51	5	20	17.0	8.0

Tableau 2 : caractéristiques considérées

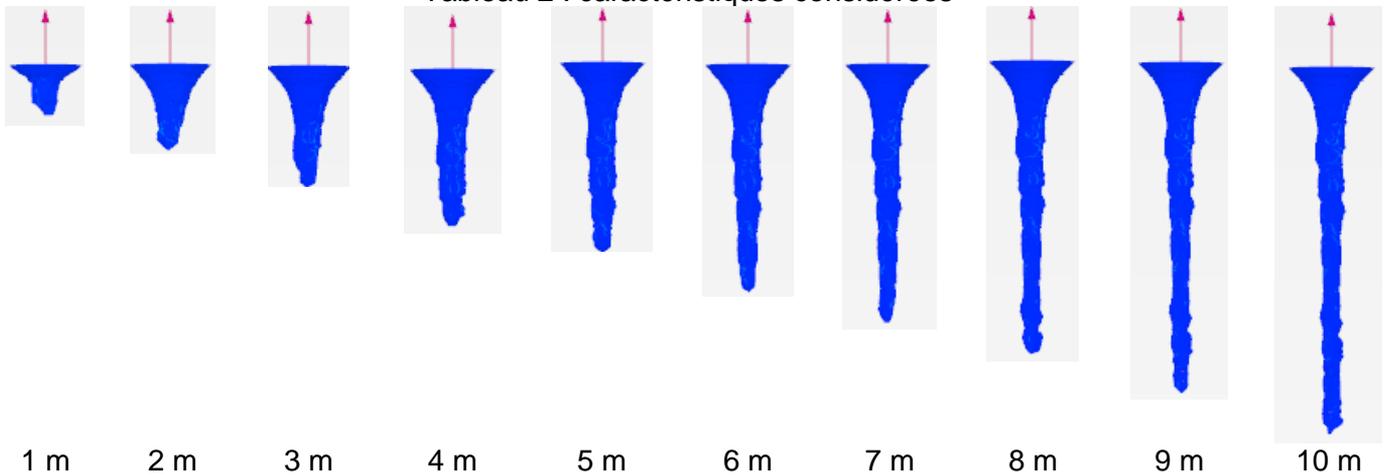
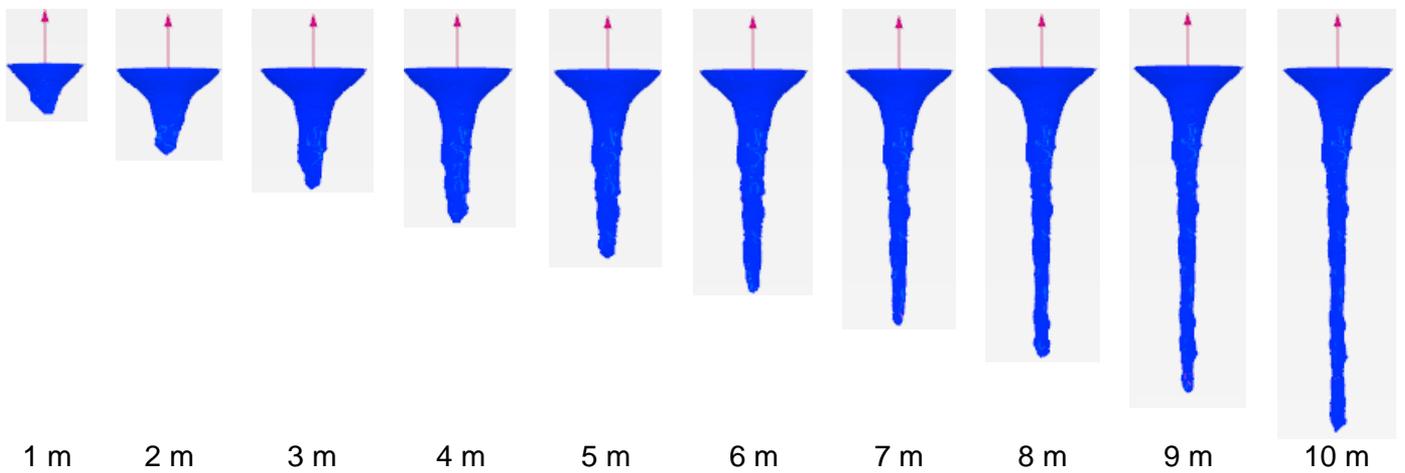


Figure 4 : déformée du sol autour du pieu avec la profondeur du pieu dans le cas d'une argile raide

pl (MPa)	qs (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)
1.0	62	15	20	17.0	8.0

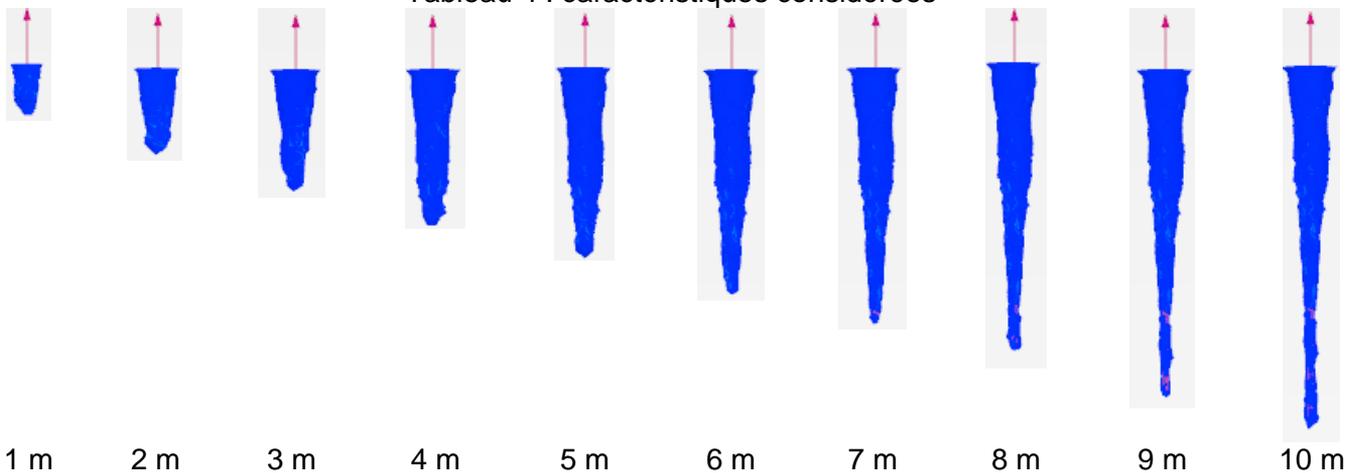
Tableau 3 : caractéristiques considérées



1 m 2 m 3 m 4 m 5 m 6 m 7 m 8 m 9 m 10 m
Figure 5 : déformée du sol autour du pieu avec la profondeur du pieu dans le cas d'une marne

p_l (MPa)	q_s (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)
1.0	133	30	30	20.0	10.0

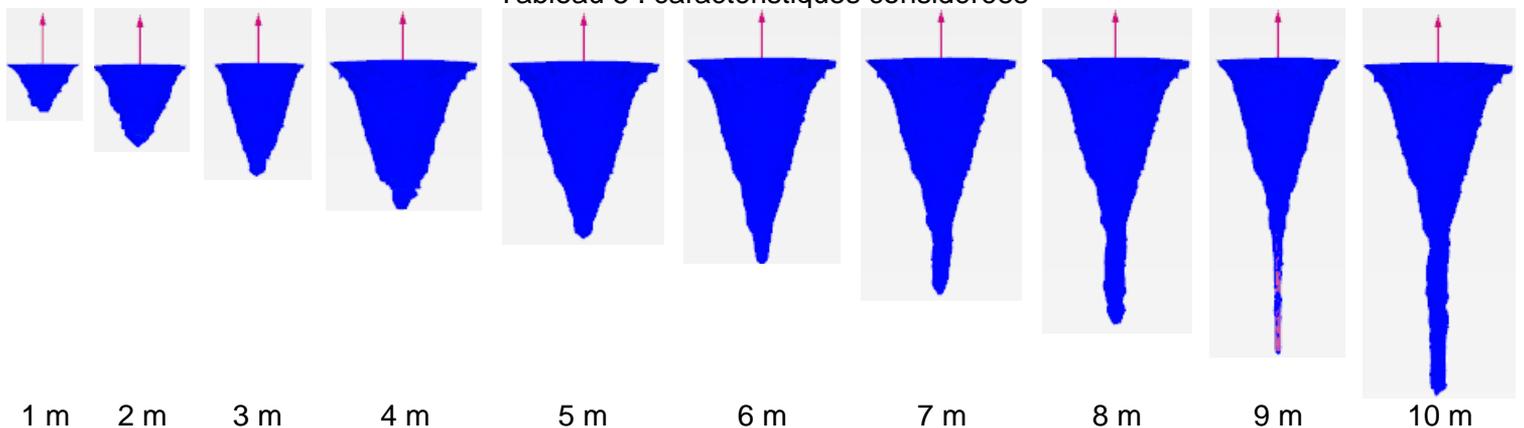
Tableau 4 : caractéristiques considérées



1 m 2 m 3 m 4 m 5 m 6 m 7 m 8 m 9 m 10 m
Figure 6 : déformée du sol autour du pieu avec la profondeur du pieu dans le cas d'un sable

p_l (MPa)	q_s (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)
0.8	75	0	30	17.0	9.5

Tableau 5 : caractéristiques considérées



1 m 2 m 3 m 4 m 5 m 6 m 7 m 8 m 9 m 10 m
Figure 7 : déformée du sol autour du pieu avec la profondeur du pieu dans le cas d'une grave

p_l (MPa)	q_s (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)
2.0	130	0	38	19.0	11.5

Tableau 6 : caractéristiques considérées

L'évolution de la déformée du sol autour du pieu montre une forte disparité avec la théorie puisque les angles des cônes obtenus sont bien inférieurs aux angles de frottement. Cette différence s'explique certainement par le fait que les mouvements du sol ne sont pas directement représentatifs des chargements de celui-ci. Cette observation est cohérente avec le commentaire du TA2020 au §G.3.1 qui nous dit « le volume d'influence est un procédé de calcul et ne correspond pas physiquement au volume de terrain déplacé au moment de l'arrachage d'un tirant ».

4. Comparaison des deux approches : à la rupture et forfaitaire / Comparison between rupture and lump sum approach

Dans ce paragraphe, nous comparerons les deux approches pour différents types de sol homogènes et différents niveaux d'eau. Nous considérons un pieu de longueur variable entre 0 et 10 m réalisé à la tarière creuse $\phi 620$ mm en maille infinie (pieu isolé). Les calculs de portance sont réalisés sans facteur de sécurité (charge limite). Nous comparerons également les résultats obtenus sans prise en compte d'une quelconque réduction de la traction. Les résultats sont comparés en terme de portance brut ou de rapport de portance (portance 1/portance 2) entre 2 méthodes de calcul.

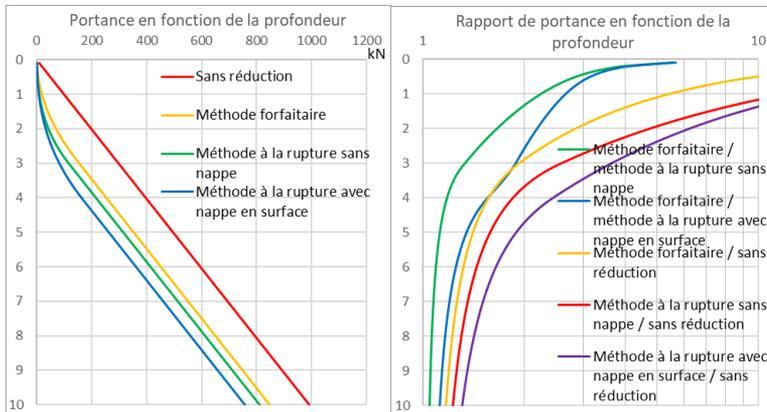


Figure 8 : exemple d'une argile molle

pl (MPa)	0.5
qs (kPa)	51
c (kPa)	5
ϕ (°)	20
γ (kN/m ³)	17.0
γ' (kN/m ³)	8.0

Tableau 7 : caractéristiques considérées

La portance obtenue à l'aide de la méthode à la rupture est bien inférieure à celle obtenue à l'aide de la méthode forfaitaire (≈ 90 kN avec nappe et ≈ 40 kN sans nappe).

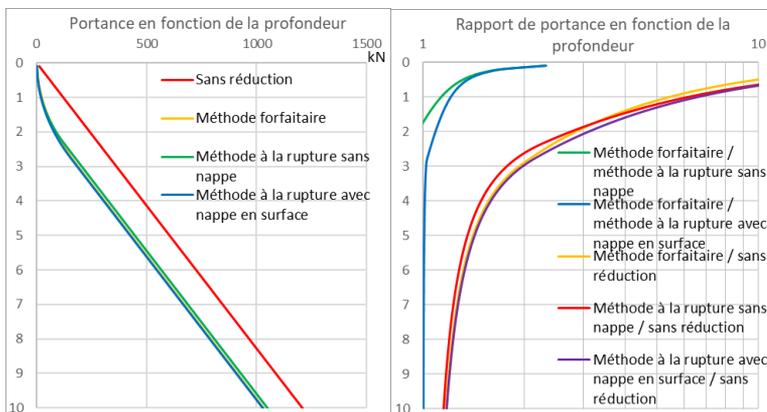


Figure 9 : exemple d'une argile raide

pl (MPa)	1.0
qs (kPa)	62
c (kPa)	15
ϕ (°)	20
γ (kN/m ³)	17.0
γ' (kN/m ³)	8.0

Tableau 8 : caractéristiques considérées

La portance obtenue à l'aide de la méthode à la rupture est quasi identique à celle obtenue à l'aide de la méthode forfaitaire et ce avec ou sans la présence d'une nappe.

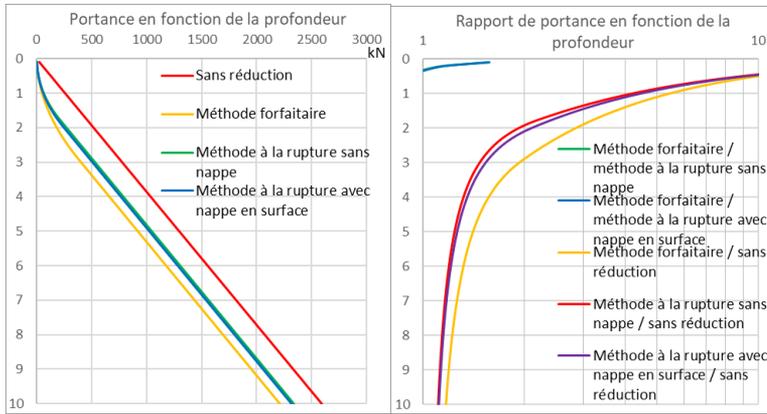


Figure 10 : exemple d'une marne

p_l (MPa)	1.0
q_s (kPa)	133
c (kPa)	30
ϕ (°)	30
γ (kN/m ³)	20.0
γ' (kN/m ³)	10.0

Tableau 9: caractéristiques considérées

La portance obtenue à l'aide de la méthode à la rupture est supérieure à celle obtenue à l'aide de la méthode forfaitaire (≈ 105 kN avec nappe et ≈ 125 kN sans nappe).

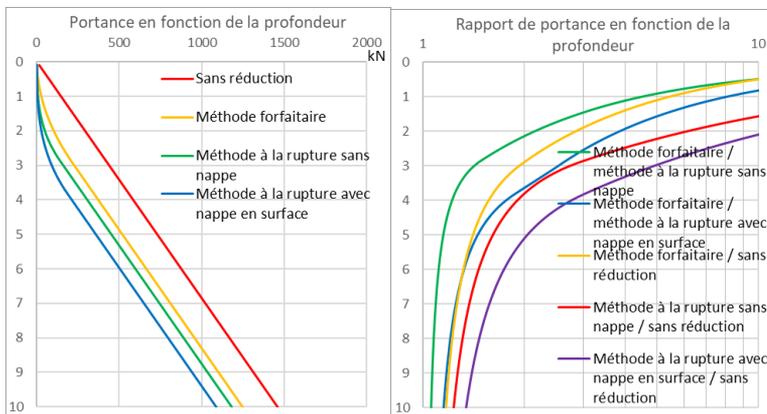


Figure 11 : exemple d'un sable

p_l (MPa)	0.8
q_s (kPa)	75
c (kPa)	0
ϕ (°)	30
γ (kN/m ³)	17.0
γ' (kN/m ³)	9.5

Tableau 10 : caractéristiques considérées

La portance obtenue à l'aide de la méthode à la rupture est bien inférieure à celle obtenue à l'aide de la méthode forfaitaire (≈ 160 kN avec nappe et ≈ 70 kN sans nappe).

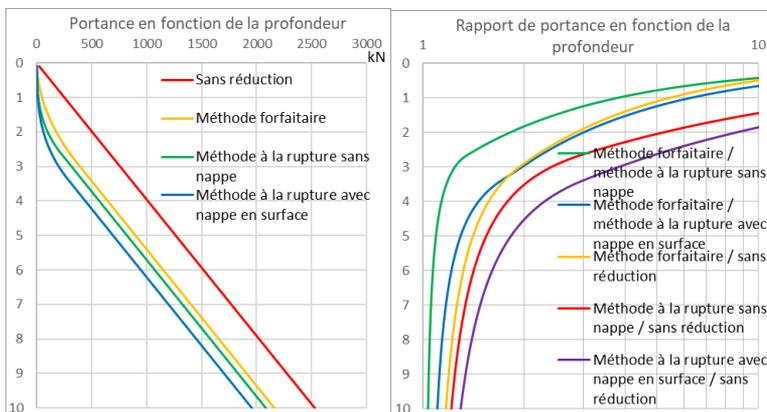


Figure 12 : exemple d'une grave

p_l (MPa)	2.0
q_s (kPa)	130
c (kPa)	0
ϕ (°)	38
γ (kN/m ³)	19.0
γ' (kN/m ³)	11.5

Tableau 11 : caractéristiques considérées

La portance obtenue à l'aide de la méthode à la rupture est bien inférieure à celle obtenue à l'aide de la méthode forfaitaire (≈ 205 kN avec nappe et ≈ 80 kN sans nappe).

L'analyse des figures 8 à 12 met en évidence que l'approche forfaitaire permet une bonne approximation par rapport à la méthode à la rupture dans les terrains cohésifs de compacité moyenne ($p_l \approx 1,0$ MPa).

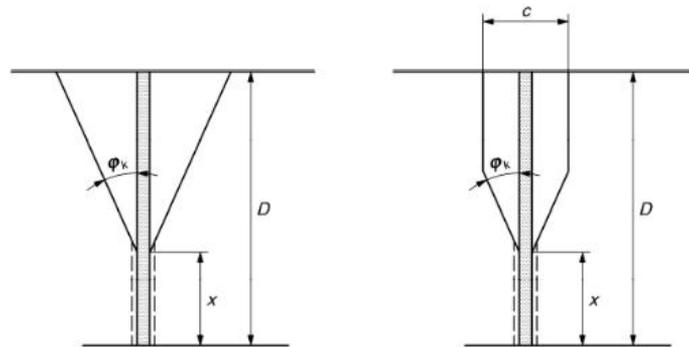
Dans les terrains cohésifs mous ($p_l \approx 0,5$ MPa) ainsi que dans les terrains frottant, la méthode forfaitaire semble surestimer la portance par rapport à la méthode à la rupture considérée ici comme référence (§3.1). Au contraire dans les terrains cohésifs de bonne compacité ($p_l \approx 2,0$ MPa), la méthode forfaitaire apparaît au contraire comme défavorable.

Également, la présence ou non de la nappe en surface conduit à une différence notable entre les deux méthodes.

Dans tous les cas, il apparaît que le rapport entre résistance avec et sans prise en compte de l'une ou l'autre des approches est d'autant plus important que la longueur du pieu est faible. Ainsi par exemple pour un pieu de 5,0 m de longueur ce rapport est d'environ 1,5 à 2,0 par rapport à un calcul sans réduction. Il est donc essentiel de toujours prendre en compte l'une ou l'autre des approches des réduction de la portance.

5. Prise en compte d'une maille finie / Finite grid consideration

Au sein d'un réseau fini de pieux les cônes de sol vont potentiellement se rejoindre comme le montre la figure issue de la NF P94-262 / 2ème tirage janvier 2013 présentée ci-dessous.



Légende : x : longueur sur laquelle le frottement axial de la fondation profonde peut être considéré – c : longueur de la maille du réseau de fondations profondes

Figure 10.3.2 — Mécanisme de rupture d'une fondation profonde isolée et d'une fondation profonde en réseau

Figure 13 : Estimation de la résistance au sein d'un réseau de pieux

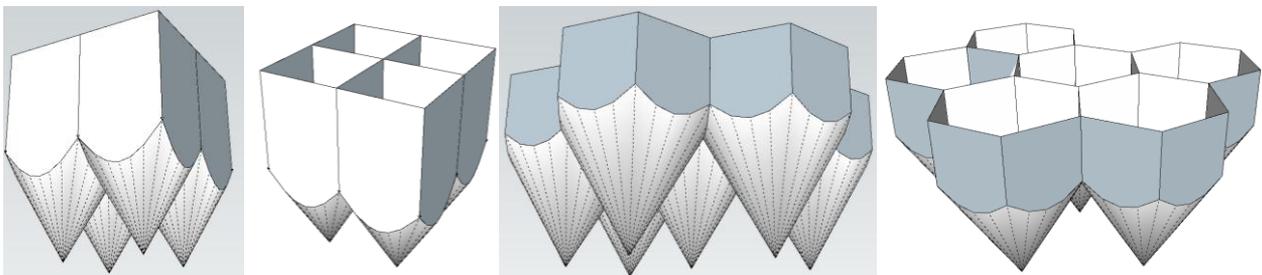


Figure 14 : Maille carrée et maille triangulaire

Dans la partie au-dessus du cône, il est possible de constater qu'aucun effort de cisaillement n'est possible. Seul le poids du volume de sol permet d'apporter une quelconque résistance. La vue 3D permet de visualiser le passage d'un comportement de cône indépendant à celui d'une maille régulière.

La méthode forfaitaire ne permet pas de tenir compte d'une maille finie (absence de paramètre dans la formule) et apparaît donc à ce titre comme inadaptée car elle ne

permet pas de tenir compte de la zone de regroupement des cônes limitant la résistance du réseau de pieu au seul poids des terrains mobilisés.

6. Facteurs de sécurité / Safety factors

Les facteurs de sécurité doivent suivre l'approche 2 qui consiste en une réduction de la résistance. Le passage d'un calcul en c et phi de type approche 3 à un calcul en résistances minorées de type approche 2 se fait de la sorte :

- Détermination du volume d'un cône à partir de l'angle φ_k de hauteur H ;
- Application du facteur de sécurité du cas de charge considéré précédemment déterminé ;
- Détermination par rétro calcul de l'angle de frottement φ_d du cône de hauteur H permettant de retrouver le volume réduit.

Sous forme d'équation nous avons donc :

$$\tan(\varphi_d) = \frac{\tan(\varphi_k)}{\sqrt{F.S.}} \quad (1)$$

$$c_d = \frac{c_k}{\sqrt{F.S.}} \quad (2)$$

7. Conclusions / Conclusions

Les calculs de portance en traction comparatifs permettent de constater plusieurs points :

- L'application de l'une ou l'autre des méthodes de dimensionnement (à la rupture ou forfaitaire) est indispensable et sa non-application conduit à une surestimation très importante de la résistance ;
- L'approche à la rupture est plus complète que l'approche forfaitaire car elle est également applicable aux réseaux de pieux mais est relativement comparable à la méthode à la rupture dans le cas de sol cohérents hors nappe ;
- Les calculs de portance à la rupture sont cohérents avec les résultats Plaxis 3D ;
- Les calculs de portance à la rupture, bien qu'intégrant des c et phi proches d'une approche 3, sont tout à fait applicables aux calculs en approche 2 car il est possible d'appliquer des facteurs de sécurité sur les angles de frottement et les cohésions ;
- L'analyse comparative des résultats de portance suggère que la méthode forfaitaire donne des bons résultats dans le cas de pieux isolés dans des sols cohésifs de compacité moyenne ($p_l \approx 1,0$ MPa).

8. Références bibliographiques / Bibliographic references

Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes – NF P94-262 Juillet 2012

Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes – NF P94-262 / 2ème tirage janvier 2013 pour la version Française

Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes – NF P94-262/A1 Juillet 2018

P. VEZOLE. Ancrages passifs verticaux et calcul à la rupture. Revue Française de Géotechnique, pp. 47-62.