

GEO5

Analyse de la capacité portante horizontale d'un pieu isolé

Résumé

L'objectif de ce cahier technique est de montrer comment utiliser le programme GEO5 « Pieux » dans le but d'évaluer la capacité portante horizontale d'un pieu isolé dans le cadre d'un problème pratique.

Le fichier exemple correspondant est « Demo_manual_16.gpi ».

ATTENTION : Dans ce document, l'utilisateur sera guidé à travers toutes les étapes de définition et d'analyse d'un projet géotechnique, dans un contexte établi par l'auteur. L'utilisateur doit être informé que les réglages de l'analyse (onglet « Paramètres ») sont de sa responsabilité et doivent être vérifiés/adaptés avant de commencer tout nouveau projet.

1 Description du problème

La spécification générale du problème a été décrite dans un cahier précédent (12. *Fondations sur pieux - Introduction*). Effectuer tous les calculs de capacité portante horizontale d'un pieu isolé en complément du problème présenté dans le cahier 13. *Analyse de la capacité portante verticale d'un pieu isolé*. La résultante des composants de charge N_1 , $M_{y,1}$, $H_{x,1}$ agit à la tête du pieu.. Calculer les dimensions du pieu conformément à la norme EN 1992-1.

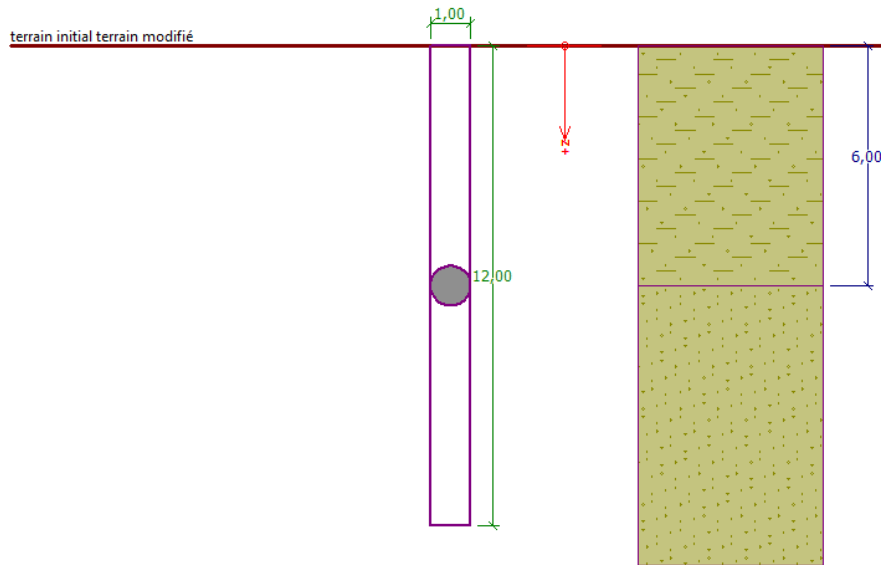


FIGURE 1 – Schéma de spécification du problème - Pieu isolé

2 Solution

Nous utiliserons le programme GEO5 « Pieux » pour analyser le problème. Le texte ci-dessous décrit la solution de ce problème étape par étape.

Le pieu chargé latéralement est analysé par la méthode des éléments finis comme une poutre reposant sur un milieu élastique de Winkler (*sous-sol élastique - méthode p-y*). Les paramètres des sols le long du fût du pieu sont caractérisés par le module de réaction horizontale du sous-sol.

Le programme propose plusieurs méthodes pour déterminer le module de la réaction du sous-sol. Les méthodes associées à une évolution linéaire (linéaire, Matlock et Reese) conviennent aux sols pulvérulents, tandis que les méthodes associées à une distribution constante (constant, Vesic) conviennent mieux aux sols cohérents. La méthode de calcul du module K_h selon ČSN 73 1004 combine les deux approches.

Dans la première partie de ce document, nous allons effectuer le calcul en utilisant un module de réaction du sous-sol constant ; dans la deuxième partie, nous réaliserons le même calcul en utilisant des méthodes différentes et comparerons les résultats.

2.1 Module de réaction constant

2.1.1 Définition des spécifications

Dans le programme « Pieux », ouvrez le fichier correspondant au cahier n°13. Tout d'abord, dans le cadre « Paramètres », cliquez sur le bouton « Édition » et vérifiez que la méthode de calcul de la capacité portante horizontale est définie comme « demi-espace élastique ».

Remarque : pour l'analyse de la capacité portante horizontale d'un pieu dans un sol homogène, il est également possible d'utiliser la méthode de Broms (pour plus de détails, visitez l'aide du programme - F1).

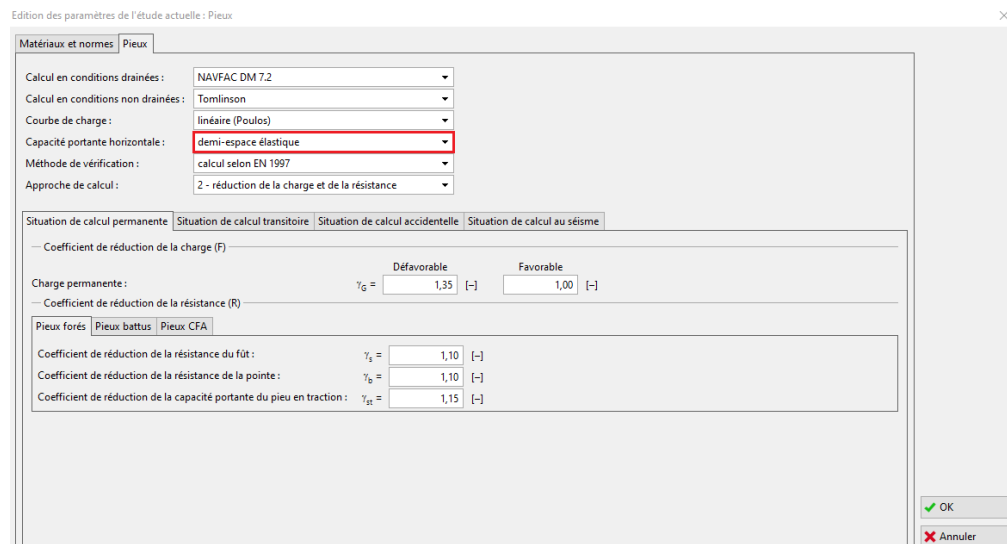


FIGURE 2 – Fenêtre de dialogue « Modifier les paramètres de l'étude actuelle »

Les autres paramètres d'analyse tels que la valeur des charges spécifiées et le profil géologique, y compris les paramètres de base liés à la résistance des sols, restent inchangés.

Dans le cadre « Paramètres », il convient bien évidemment de décocher l'option « Ne pas considérer la capacité portante horizontale ».

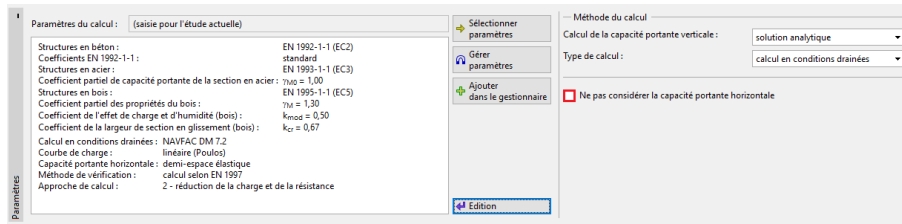


FIGURE 3 – Cadre « Paramètres »

Passez ensuite au cadre « Module K_h », dans lequel nous choisissons le module « constant ».

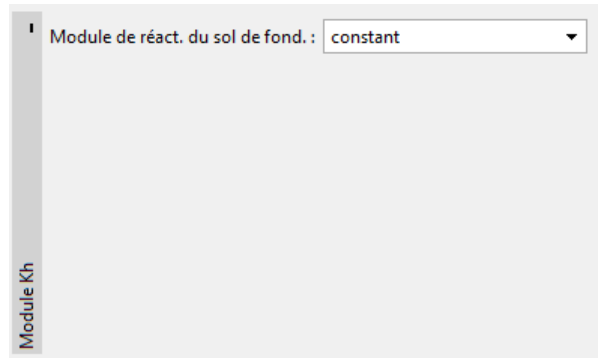


FIGURE 4 – Cadre « Module K_h »

Remarque : l'évolution constante du module de la réaction horizontale du sous-sol dépend du module de déformation du sol E_{def} [MPa] et de la largeur réduite du pieu r [m] (pour plus de détails, visitez l'aide du programme - F1).

Ensuite, dans le cadre « Sols », nous allons définir les paramètres des sols - la valeur de l'angle de transfert β [°] dans l'intervalle $[\varphi_{ef}/4, \varphi_{ef}]$. Ce coefficient est donc déterminé par rapport à l'angle de frottement interne du sol φ_{ef} (pour plus de détails, visitez l'aide du programme - F1).

Sols	Poids volumique γ [kN/m ³]	Angle de frottement interne φ_{ef} [°]	Angle de transfert β [°]	Type de sol
Argile sableuse (CS), consistance ferme	18,5	24,5	10	cohérent
Sable avec trace de fines (S-F), sol moyennement dense	17,5	29,5	15	pulvérulent

TABLE 1 – Tableau des paramètres des sols - Capacité portante horizontale d'un pieu isolé

Passez maintenant au cadre « Capacité portante horizontale », qui permet de déterminer la valeur de la déformation horizontale maximale à la tête du pieu, la distribution des efforts internes le long du fût du pieu et les résultats de dimensionnement du pieu pour l'évaluation du renforcement du béton dans le sens de l'effet maximum.

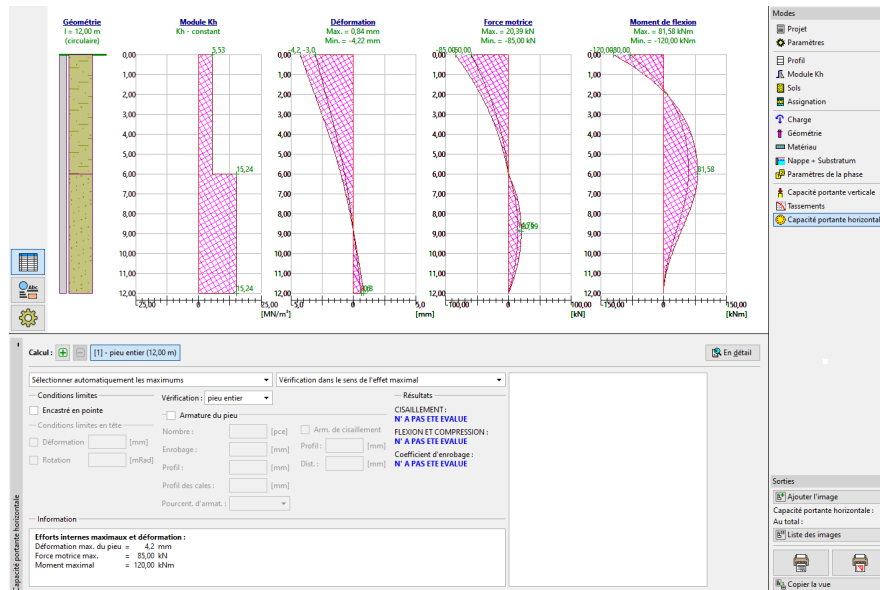


FIGURE 5 – Cadre « Capacité portante horizontale » - Évaluation pour une distribution constante du module K_h

Remarque : la condition aux limites associée à l'installation de la pointe du pieu (encastré en pointe) est modélisée dans le cas de pieux en appui sur un sous-sol en roche dure ou en semi-roche (ce n'est pas le cas pour cette étude). Les conditions aux limites en tête du pieu sont appliquées lorsque la charge de déformation est prise en compte, dans ce cas seules la rotation et la déformation sont définies dans le programme, sans définir l'effort de charge (pour plus de détails, visitez l'aide du programme - F1) .

Dans ce cadre, nous allons également modéliser le dimensionnement de l'armature du pieu. Nous allons concevoir une armature structurale longitudinale - **18 pièces Ø 16 mm** et un enrobage minimal en béton de **60 mm**, correspondant au degré d'exposition environnementale XC1.

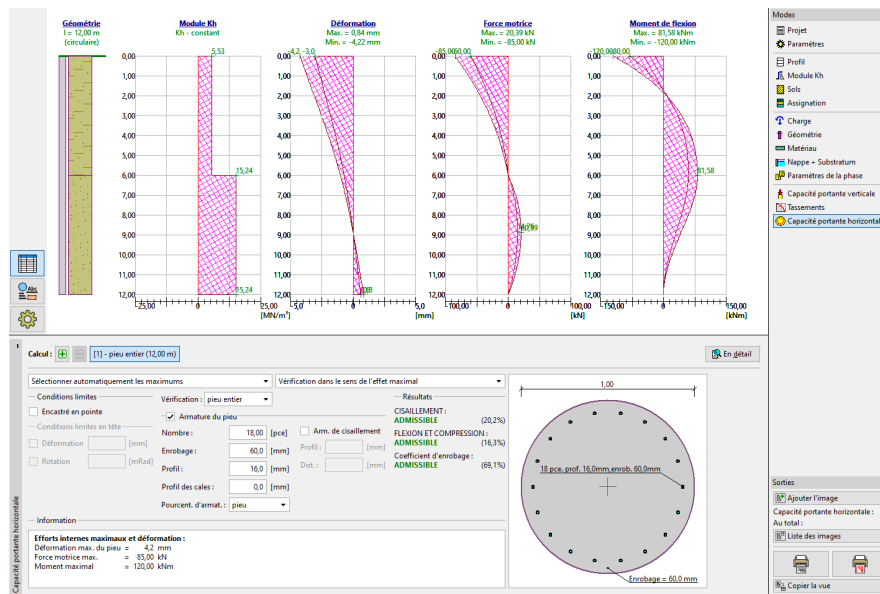


FIGURE 6 – Cadre « Capacité portante horizontale » - Dimensionnement

Pour cette étude, nous considérons un pourcentage d'armature pour le pieu isolé chargé latéralement conformément à la norme *ČSN EN 1536 : Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Pieux forés* (Tableau 4 - Armature minimale des pieux forés). Cette possibilité est définie dans le programme en sélectionnant l'option de pourcentage d'armature « pieu ».

Aire de la section du pieu $A_c [m^2]$	Aire de l'armature longitudinale $A_s [m^2]$
$A_c \leq 0,5 m^2$	$A_s \geq 0,5\% \cdot A_c$
$0,5 m^2 \leq A_c \leq 1,0 m^2$	$A_s \geq 0,0025 m^2$
$A_c > 1,0 m^2$	$A_s \geq 0,25\% \cdot A_c$

TABLE 2 – EN 1536 : Tableau 4 - Armature minimale des pieux forés

Remarque : dans le cas d'éléments comprimés, il est préférable d'utiliser le pourcentage d'armature comme s'il s'agissait d'un « pilier », tandis qu'une « poutre » est préférable pour les pieux soumis à la flexion. Pour une combinaison de charges verticales et latérales, la ČSN EN 1536 recommande un rapport d'armature minimum pour les pieux forés correspondant à la proportion de l'aire de l'armature sur l'aire de béton (pour plus de détails, consultez l'aide du programme - F1).

Nous pouvons voir le taux de travail de la section du pieu soumis à la flexion et la condition pour le pourcentage d'armature minimum dans les résultats de dimensionnement du pieu (en cliquant sur le bouton « En détail »).

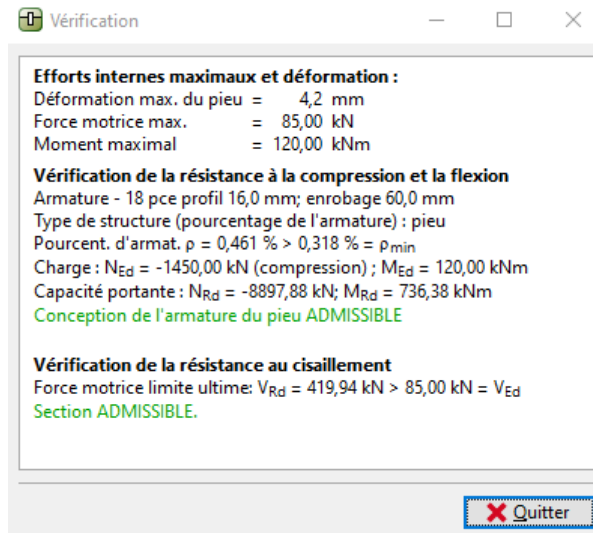


FIGURE 7 – Fenêtre de dialogue « Vérification (détaillée) »

2.1.2 Résultats de l'analyse

Dans le cadre de l'évaluation du pieu isolé chargé latéralement, nous nous intéressons à la distribution des efforts internes le long du fût du pieu, aux déformations maximales et au taux de travail de la section du pieu. Pour une

évolution constante du module de la réaction horizontale du sous-sol, les valeurs résultantes sont les suivantes :

- déformation maximale du pieu : $u_{max} = 4,2 \text{ mm}$
- force de cisaillement (motrice) maximale : $Q_{max} = 85,0 \text{ kN}$
- moment de flexion maximal : $M_{max} = 120,0 \text{ kNm}$
- capacité portante du pieu (flexion et compression) : 16,5% **ADMIS-SIBLE**
- capacité portante du pieu (cisaillement) : 20,2% **ADMISSIBLE**
- coefficient d'enrobage (pourcentage d'armature) : 69,1% **ADMISSIBLE**

2.2 Comparaison des résultats issus différentes méthodes de calcul du module de réaction du sous-sol

Les valeurs et l'évolution du module de la réaction horizontale du sous-sol varient selon la méthode d'analyse utilisée et les paramètres d'entrée du sol qui l'affectent. Dans chaque méthode de calcul, différents paramètres du sol affectent les résultats, à savoir :

- CONSTANT : angle de transfert $\beta [^\circ]$
- LINÉAIRE (Bowles) : angle de transfert $\beta [^\circ]$, coefficient $k [\text{MN}/\text{m}^3]$ selon le type de sol
- selon la norme ČSN 73 1004 : qu'il s'agisse d'un sol cohérent ou pulvérulent, module de compressibilité horizontale $n_h [\text{MN}/\text{m}^3]$
- selon VESIC : module d'élasticité $E [\text{MPa}]$

Lorsque la méthode de calcul du module de la réaction horizontale du sous-sol est modifiée, nous devons saisir des paramètres de sol supplémentaires dans le programme (pour plus d'informations, voir l'aide du programme - F1) comme suit :

Module de réaction du sous-sol $k_h [\text{MN}/\text{m}^3]$	Angle de transfert $\beta [^\circ]$	Coefficient $k [\text{MN}/\text{m}^3]$	Module d'élasticité $E [\text{MPa}]$	Module de compressibilité horizontale $n_h [\text{MN}/\text{m}^3]$
CONSTANT	10 - CS	—	—	—
	15 - S-F			
LINÉAIRE (Bowles)	10 - CS	60 - CS	—	—
	15 - S-F	150 - S-F		
ČSN 73 1004	Sol cohérent - CS, consistance ferme			—
	Sol pulvérulent - S-F, moyennement dense			4,5
VESIC	—	—	5,0 - CS	—
			15,0 - S-F	

TABLE 3 – Tableau récapitulatif des paramètres du sol pour la capacité portante horizontale d'un seul isolé

Nous allons maintenant revenir au cadre « Module K_h » et modifier les para-

mètres. Nous modifierons la méthode de calcul du module de réaction horizontale du sous-sol puis ajouterons les paramètres requis des sols. Nous appliquerons la procédure pour les méthodes suivantes :

- linéaire (selon Bowles)
- selon la norme ČSN 73 1004
- selon Vesic.

2.2.1 Méthode linéaire (selon Bowles)

Tout d'abord, allez dans le cadre « Module K_h » et modifiez le paramètre sur « linéaire ».

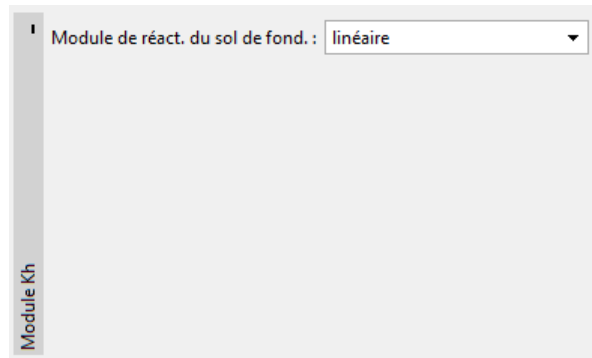


FIGURE 8 – Cadre « Module K_h »

Ensuite, dans le cadre « Sols », sélectionnez le sol « Argile sableuse (CS), consistance ferme » et cliquez sur le bouton « Éditer ». Modifiez le coefficient k de sorte qu'il prenne pour valeur 60 MN/m^3 et cliquez sur « OK ».

Édition des propriétés des sols

— Identification —
Nom : Argile sableuse (CS), consistance ferme
Argile sableuse (CS), consistance rigide

— Données de base —
Poids volumique : $\gamma = 18,50$ [kN/m³] 18,5
Coefficient de Poisson : $\nu = 0,35$ [-] 0,35

— Méthode NAVFAC —
Type de sol : cohérent
Cohésion du sol : $c_u = 50,00$ [kPa] 50
Coefficient d'adhérence : $\alpha = 0,60$ [-]

— Caractéristiques de déformation —
Calcul de tassement : saisir Eoed
Module oedométrique : $E_{oed} = 8,00$ [MPa] 6 - 10

— Soulèvement hydraulique —
Calcul soulèvem. hydraulique : standard
Poids volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} = 20,50$ [kN/m³]

— Détermination du module de réaction du sol de fondation —
Coefficient : $k = 60,00$ [MN/m³]
Angle de transfert : $\beta = 10,00$ [°]

— Affichage —
Catégorie des échantillons : GEO
Chercher :
Sous-catégorie : Sols (1 - 16)
Échantillon : 5 Argile sableuse
Couleur :
Arrière-plan : automatique
Saturation de la couleur <10 - 90> : 50 [%]

Classer Supprimer OK + OK Annuler

FIGURE 9 – Cadre « Sols » - Modification des paramètres du sol (sol CS)

Répétez la même procédure pour le sol « Sable avec trace de fines (S-F) ». Cette fois-ci $k = 150 \text{ MN/m}^3$.

Édition des propriétés des sols

— Identification —
Nom :
Sable avec l'addition de sol fin (S-F), moyennement dense

— Données de base —
Poids volumique : $\gamma =$ [kN/m³] 17,5
Coefficient de Poisson : $\nu =$ [-] 0,30

— Méthode NAVFAC —
Type de sol :
Angle de frottement interne : $\phi_{gr} =$ [*] 28 - 31
Angle de frottement du fût du pieu :
Coefficient de la pression latérale du sol :

— Caractéristiques de déformation —
Calcul de tassement :
Module oedométrique : $E_{oed} =$ [MPa] 16 - 26

— Souèvement hydraulique —
Calcul soulèvem. hydraulique :
Poids volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} =$ [kN/m³]

— Détermination du module de réaction du sol de fondation —
Coefficient : $k =$ [MN/m³]
Angle de transfert : $\beta =$ [*]

— Affichage —
Catégorie des échantillons :
Chercher :
Sous-catégorie :
Échantillon :
Couleur :
Arrière-plan :
Saturation de la couleur <10 - 90> : [%]

Classer Supprimer OK + OK Annuler

FIGURE 10 – Cadre « Sol » - Modification des paramètres du sol (sol S-F)

Maintenant, passez au cadre « Capacité portante horizontale » qui restitue les résultats du calcul.

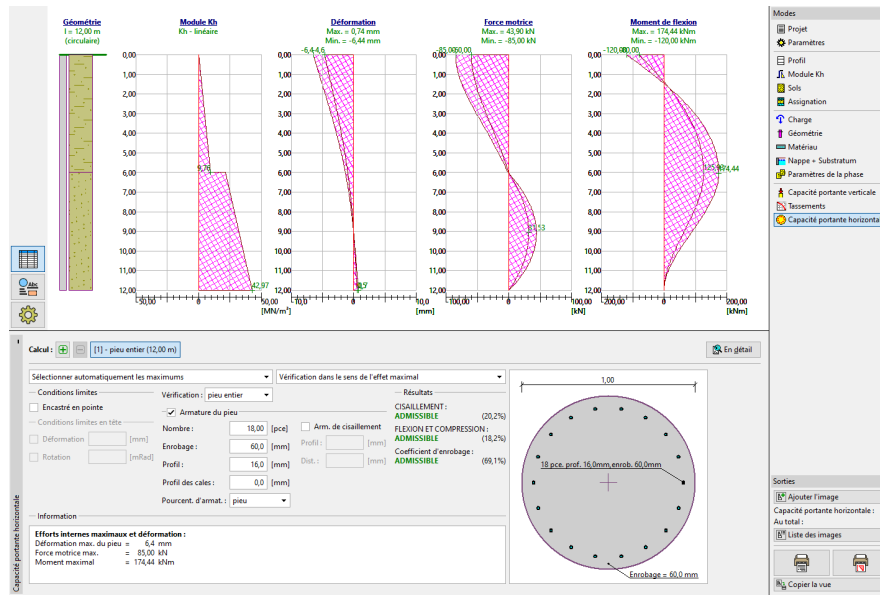


FIGURE 11 – Cadre « Capacité portante horizontale » - Distribution du module de la réaction horizontale du sous-sol K_h (linéaire), déformation et efforts internes

2.2.2 Selon la norme ČSN 73 1004

À présent, retournez au cadre « Module K_h » et modifiez le paramètre sur « selon la norme ČSN 73 1004 ».

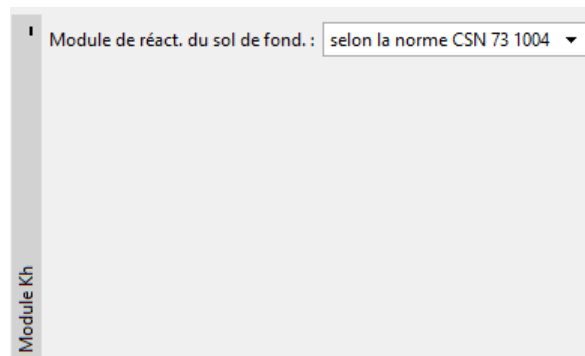


FIGURE 12 – Cadre « Module K_h »

Dans le cadre « Sols », il convient de valoriser le module de compressibilité horizontale pour le sol pulvérulent « Sable avec trace de fines (S-F), sol moyennement dense ». Cliquez sur le bouton « Éditer » et valorisez le module n_h avec $4,50 \text{ MN/m}^3$.

Édition des propriétés des sols

— Identification —
Nom :
Sable avec l'addition de sol fin (S-F), moyennement dense

— Données de base —
Poids volumique : $\gamma =$ [kN/m³] 17,5
Coefficient de Poisson : $\nu =$ [-] 0,30

— Méthode NAVFAC —
Type de sol :
Angle de frottement interne : $\phi_{gr} =$ [*] 28 - 31
Angle de frottement du fût du pieu :
Coefficient de la pression latérale du sol :

— Caractéristiques de déformation —
Calcul de tassement :
Module oedométrique : $E_{oed} =$ [MPa] 16 - 26

— Souèvement hydraulique —
Calcul soulèvem. hydraulique :
Poids volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} =$ [kN/m³]

— Détermination du module de réaction du sol de fondation —
Type de sol :
Module de compressibilité horizontale : $n_h =$ [MN/m²]

— Affichage —
Catégorie des échantillons :
Chercher :
Sous-catégorie :
Échantillon :
Couleur :
Arrière-plan :
Saturation de la couleur <10 - 90> : [%]

Classer Supprimer OK + ↕ OK Annuler

FIGURE 13 – Cadre « Sol » - Modification des paramètres du sol (sol S-F)

Les résultats peuvent maintenant être consultés dans le cadre « Capacité portante horizontale ».

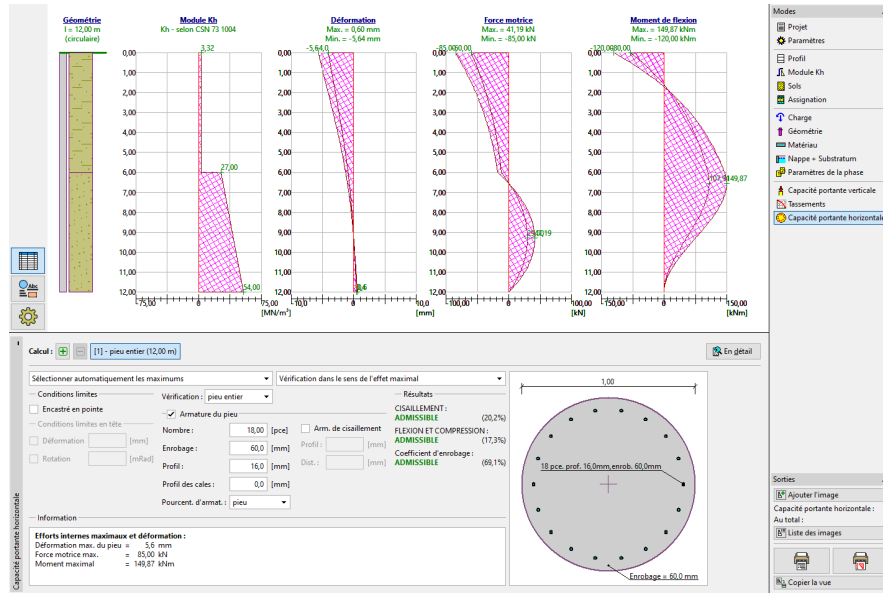


FIGURE 14 – Cadre « Capacité portante horizontale » - Distribution du module de la réaction horizontale du sous-sol K_h (CSN 73 1004), déformation et efforts internes

2.2.3 Selon Vesic

Retournez au cadre « Module K_h » et modifiez le paramètre sur « selon Vesic ».

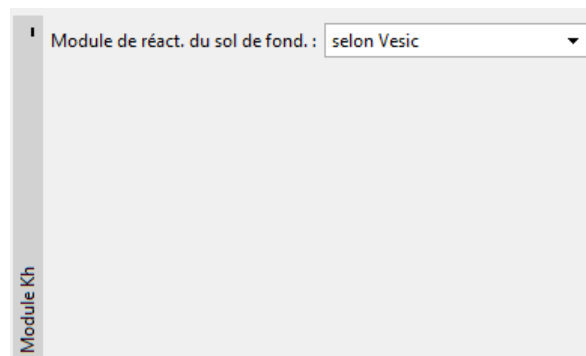


FIGURE 15 – Cadre « Module K_h »

Dans le cadre « Sols », il convient de valoriser le module d'élasticité E pour les deux sols. Dans le cas du sol « Argile sableuse (CS), consistance ferme », sa valeur sera de 5 MPa.

FIGURE 16 – Cadre « Sols » - Modification des paramètres du sol (sol CS)

Pour le sol « Sable avec trace de fines (S-F), sol moyennement dense », sa valeur sera de 15,5 MPa.

Edition des propriétés des sols

— Identification —
Nom :
Sable avec l'addition de sol fin (S-F), moyennement dense

— Données de base —
Poids volumique : $\gamma =$ [kN/m³] 17,5
Coefficient de Poisson : $\nu =$ [-] 0,30

— Méthode NAVFAC —
Type de sol :
Angle de frottement interne : $\phi_{ef} =$ [°] 28 - 31
Angle de frottement du fût du pieu :
Coefficient de la pression latérale du sol :

— Caractéristiques de déformation —
Calcul de tassement :
Module oedométrique : $E_{oed} =$ [MPa] 16 - 26

— Souèvement hydraulique —
Calcul soulèvem. hydraulique :
Poids volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} =$ [kN/m³]

— Détermination du module de réaction du sol de fondation —
Module d'élasticité : $E =$ [MPa]

— Affichage —
Catégorie des échantillons :
Chercher :
Sous-catégorie :
Echantillon :
Couleur :
Arrière-plan :
Saturation de la couleur <10 - 90> : [%]

Classer Supprimer OK + OK Annuler

FIGURE 17 – Cadre « Sols » - Modification des paramètres du sol (sol S-F)

Les résultats peuvent maintenant être consultés dans le cadre « Capacité portante horizontale ».

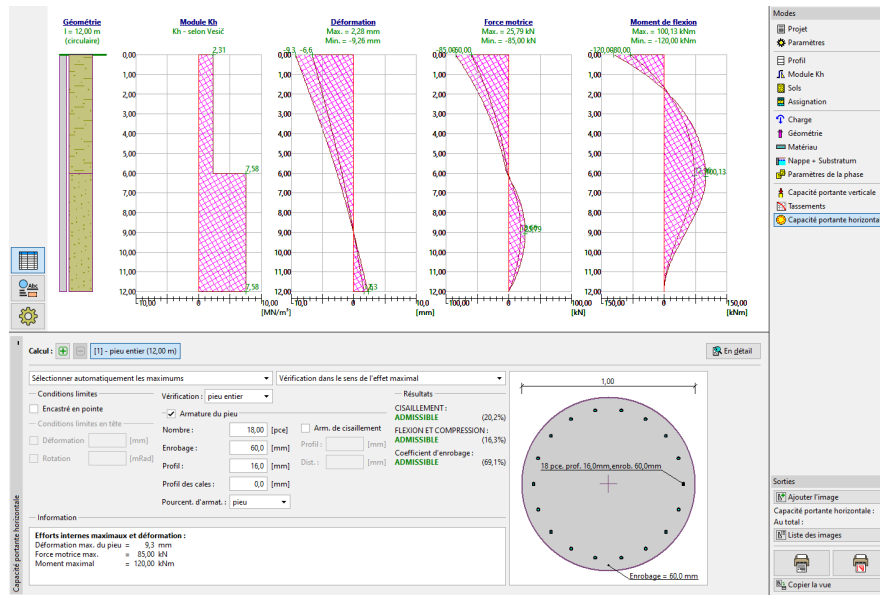


FIGURE 18 – Cadre « Capacité portante horizontale » - Distribution du module de la réaction horizontale du sous-sol K_h (Vesic), déformation et efforts internes

2.2.4 Résultats des analyses de capacité portante horizontale du pieu isolé

Les résultats des analyses de capacité portante horizontale du pieu isolé en fonction de la méthode utilisée pour le calcul du module de la réaction horizontale du sous-sol K_h sont présentés dans le tableau suivant :

Module de réaction du sous-sol K_h [MN/m^3]	Déformation maximale du pieu u_{max} [mm]	Moment de flexion maximal M_{max} [kNm]	Capacité portante du pieu [%]
CONSTANT	4,2	120,0	16,3
LINÉAIRE (Bowles)	6,4	174,44	18,2
CSN 73 1002	5,6	149,87	17,3
VESIC	9,3	120,0	16,3

TABLE 4 – Résumé des résultats - Capacité portante horizontale et dimensionnement du pieu isolé

3 Conclusion

À partir des résultats du calcul, nous constatons que les valeurs observées des efforts internes le long du fût du pieu et les déformations maximales à la tête du pieu sont légèrement différentes, mais l'influence de la méthode de calcul du module de réaction du sous-sol sélectionnée n'est pas cruciale.