

PAROI MOULÉE EN BÉTON ARMÉ AVEC UN NIVEAU DE TIRANTS

Programme : GEO5 2020 – Vérification des Soutènement

Fichiers : NFP94-282-Ex2-ELS.gp2 ; NFP94-282-Ex2-ELU1.gp2 ; NFP94-282-Ex2-ELU2.gp2

Contexte

L'application de l'Eurocode 7 se complète par une annexe nationale. En France, le choix a été fait de rédiger une norme d'application pour chacun des types d'ouvrages géotechniques. Pour les écrans, la norme NF P94-282 est applicable. Un comité d'expert sous l'égide du CEREMA a rédigé un guide d'application. Nous nous basons ici sur l'exemple 2 de ce guide pour appliquer le programme GEO5 – Vérification des soutènements. Dans la suite, il sera cité comme "Référence".

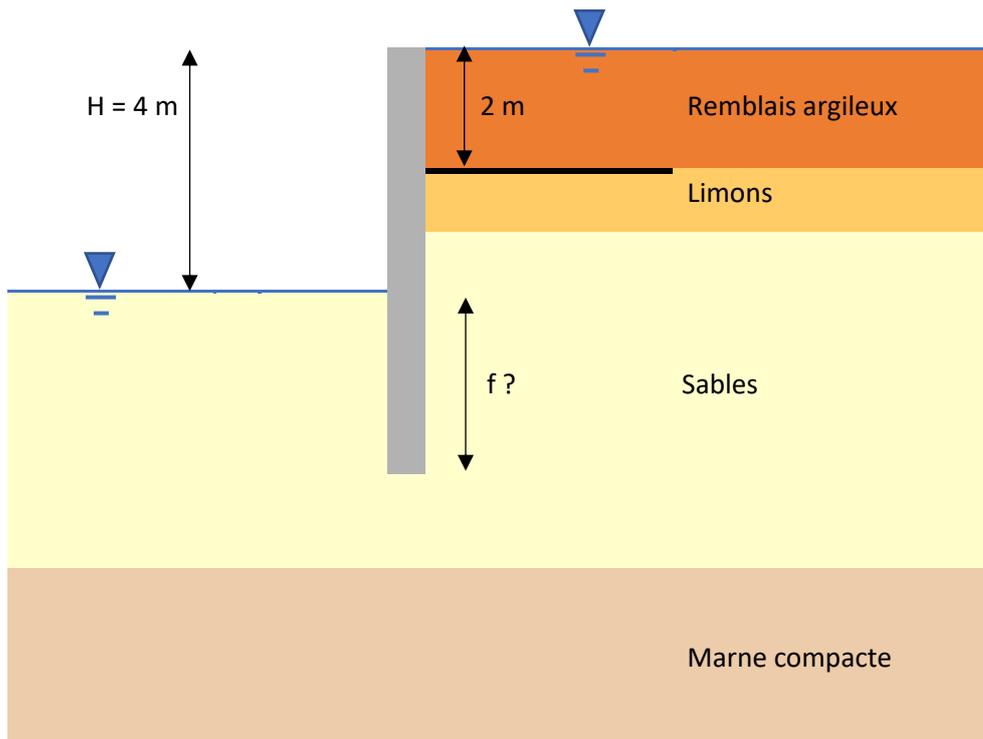
Table des matières

1	HYPOTHESES.....	2
1.1	Géométrie.....	2
1.2	Données géotechniques.....	2
1.3	Démarche de calcul.....	3
2	CALCUL MISS.....	4
2.1	Définition du modèle.....	4
2.2	Première phase : Etat de contraintes initiales.....	8
2.3	Seconde phase – Excavation à -2 m.....	10
2.4	Troisième phase – Mise en place des tirants.....	11
2.5	Quatrième phase – Excavation à -4 m.....	12
2.6	Passage des calculs.....	12
2.7	Résultats de la phase 4.....	13
3	CALCUL ELU 1.....	14
3.1	Item "Paramètres".....	14
3.2	Passage des calculs.....	15
3.3	Résultats de la phase 4.....	15
4	CALCUL ELU 2.....	16
4.1	Item "Paramètres".....	16
4.2	Passage des calculs.....	16
4.3	Résultats de la phase 4.....	17
5	SYNTHESE.....	18
5.1	Efforts dans l'écran et dans le tirant.....	18
5.2	Vérification du rapport butée mobilisée / butée mobilisable (GEO).....	18
5.3	Justification du tirant (STR).....	19

1 HYPOTHESES

1.1 Géométrie

- Soutènement : paroi moulée en béton armé de 0,8 m d'épaisseur.
- Tirants : horizontaux à 2 m du sommet de l'écran ; acier de construction, HA de diamètre 32 mm, diamètre de forage de 120 mm ; longueur totale de 20 m dont 10 m de longueur libre (pas de précontrainte).



1.2 Données géotechniques

	Epaisseur (m)	Poids volumique γ (kN/m ³)	Angle de frottement ϕ' (°)	Cohésion c' (kPa)	Module pressiométrique E_M (MPa)	Coefficient rhéologique α
Remblais argileux	2	18	18	0	2,5	0,5
Limons	1	19	25	5	5	0,5
Sable	4	20	30	0	20	0,33
Marne compacte	>10	20	30	30	50	0,66

1.3 Démarche de calcul

On fait le choix d'un modèle de calcul aux états limites (MEL) ou d'un modèle d'interaction sol-structure (MISS) et d'une distribution de coefficients partiels.

Le modèle MEL est adapté aux écrans en consoles (on utiliserait alors le programme GEO5 – Conception des soutènements). Ce n'est pas le cas présent, on va ici utiliser le programme GEO5-Vérification des soutènements qui peut traiter les deux approches.

On va réaliser :

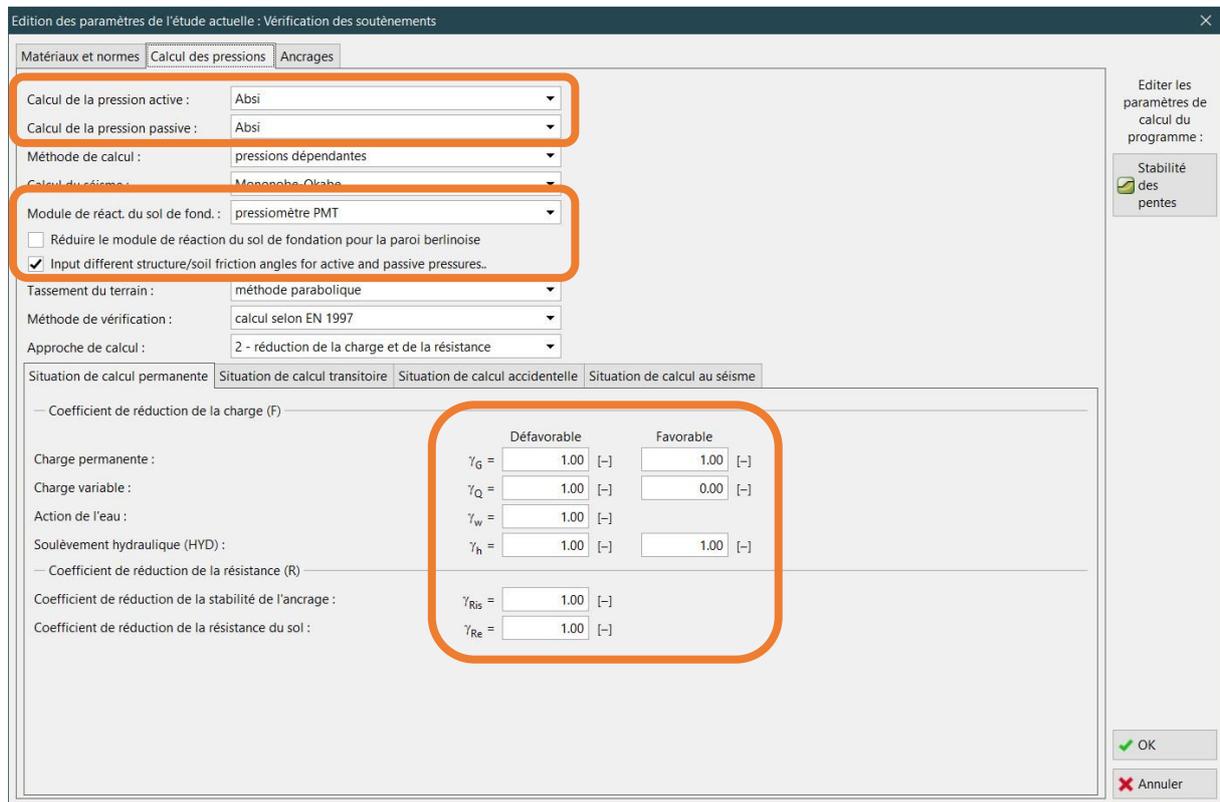
- Un calcul MISS avec vérification du rapport de 1.89 entre butée mobilisable et butée mobilisée.
- Un calcul MEL avec pondération des actions par 1.35 et des résistances par 1.4
- Un calcul MEL avec pondérations des résistances par $1.4 \times 1.35 = 1.89$.

2 CALCUL MISS

2.1 Définition du modèle

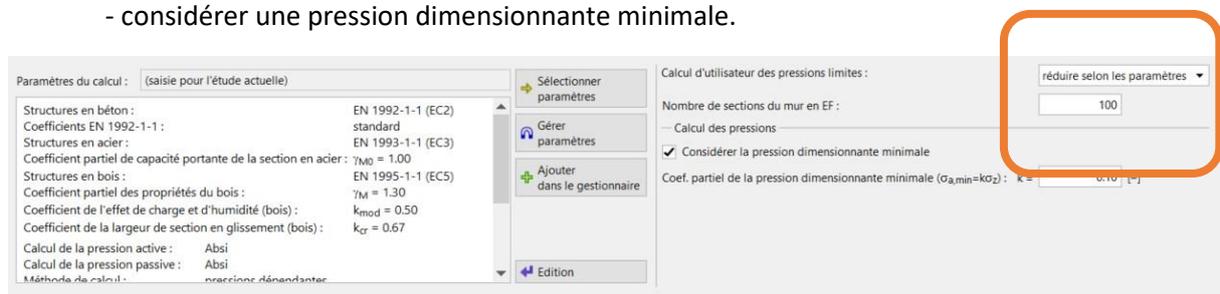
2.1.1 Item "Paramètres"

Cliquer sur "Edition" pour régler les paramètres : en situation permanente tous les coefficients sont 1.0.



On n'oubliera pas de vérifier les réglages suivants :

- utiliser les coefficients partiels pour les calculs de pression,
- considérer une pression dimensionnante minimale.



2.1.2 Item "Profil"

La cote de surface est établie à la cote de 0 m.

On ajoute 4 couches d'épaisseurs :

t1 = 2 m

t2 = 1 m

t3 = 4 m

t4 = 12 m

Num.	Epaisseur de la couche t [m]	Profondeur z [m]
1	2.00	0.00 .. 2.00
2	1.00	2.00 .. 3.00
3	4.00	3.00 .. 7.00
4	12.00	7.00 .. 19.00
5	-	19.00 .. ∞

+
⌨
Ajouter

— Information sur la position —

Cote de surface : [m]

Coordonnées GPS

GPS : (n'est pas saisi)



Afficher sur la carte

2.1.3 Item "Module Kh"

On règle ici la méthode de calcul sur "NF P94-282", et le module sera défini comme un paramètre de sol plutôt que d'être interpréter un essai pressiométrique.

— Paramètres —

Méthode de calcul :

Module de Ménard :

2.1.4 Item "Sols"

On définit ici les 4 types de sol qui constitue le massif.

On intègre les valeurs de frottement actif ($2/3\varphi$) et passif ($-1/2\varphi$).

	Poids volumique γ (kN/m ³)	Angle de frottement φ' (°)	φ_a (°)	φ_p (°)	Cohésion c' (kPa)	Module pressiométrique E_M (MPa)	Coefficient rhéologique α
Remblais argileux	18	18	12	9	0	2,5	0,5
Limons	19	25	16.67	12.5	5	5	0,5
Sable	20	30	20	15	0	20	0,33
Marne compacte	20	30	20	15	30	50	0,66

Édition des propriétés des sols

Identification

Nom : Remblais argileux

Données de base

Poids volumique : $\gamma = 18.00$ [kN/m³]

Etat de contraintes : effectives

Angle de frottement interne : $\varphi_{ef} = 18.00$ [°]

Cohésion du sol : $c_{ef} = 0.00$ [kPa]

Angle de frottement actif : $\delta_{act} = 12.00$ [°]

Angle de frottement passif : $\delta_{pas} = 9.00$ [°]

Pression au repos

Sol : pulvérulent

Soulèvement hydraulique

Calcul soulèvem. hydraulique : standard

Poids volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} = 18.00$ [kN/m³]

Module de réaction du sol de fondation (Ménard)

Module pressiométrique : $E_M = 2.50$ [MPa]

Coefficient rhéologique : $\alpha = 0.50$ [-]

Affichage

Catégorie des échantillons : GEO

Chercher :

Sous-catégorie : Sols (1 - 16)

Echantillon : 1 Loam

Couleur :

Arrière-plan : saisir la couleur

Classer Supprimer OK + ↓ OK Annuler

Boite de dialogue pour saisie des paramètres du remblais argileux

Édition des propriétés des sols

Identification

Nom : Limons

Données de base

Poids volumique : $\gamma = 19.00$ [kN/m³]

Etat de contraintes : effectives

Angle de frottement interne : $\varphi_{ef} = 25.00$ [°]

Cohésion du sol : $c_{ef} = 5.00$ [kPa]

Angle de frottement actif : $\delta_{act} = 16.67$ [°]

Angle de frottement passif : $\delta_{pas} = 12.50$ [°]

Pression au repos

Sol : pulvérulent

Soulèvement hydraulique

Calcul soulèvem. hydraulique : standard

Poids volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} = 19.00$ [kN/m³]

Module de réaction du sol de fondation (Ménard)

Module pressiométrique : $E_M = 5.00$ [MPa]

Coefficient rhéologique : $\alpha = 0.50$ [-]

Affichage

Catégorie des échantillons : GEO

Chercher :

Sous-catégorie : Sols (1 - 16)

Echantillon : 1 Loam

Couleur :

Arrière-plan : saisir la couleur

Classer Supprimer OK + ↑ OK + ↓ OK Annuler

Boite de dialogue pour saisie des paramètres des limons

Edition des propriétés des sols

— Identification

Nom :

— Données de base

Poids volumique : $\gamma =$ [kN/m³]

Etat de contraintes :

Angle de frottement interne : $\varphi_{ef} =$ [°]

Cohésion du sol : $c_{ef} =$ [kPa]

Angle de frottement actif : $\delta_{act} =$ [°]

Angle de frottement passif : $\delta_{pas} =$ [°]

— Pression au repos

Sol :

— Soulèvement hydraulique

Calcul soulèvem. hydraulique :

Poids volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} =$ [kN/m³]

— Module de réaction du sol de fondation (Ménard)

Module pressiométrique : $E_M =$ [MPa]

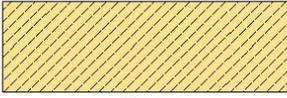
Coefficient rhéologique : $\alpha =$ [-]

Affichage

Catégorie des échantillons :

Chercher :

Sous-catégorie :

Echantillon : 

Couleur :

Arrière-plan :

Boite de dialogue pour saisie des paramètres des sables

Edition des propriétés des sols

— Identification

Nom :

— Données de base

Poids volumique : $\gamma =$ [kN/m³]

Etat de contraintes :

Angle de frottement interne : $\varphi_{ef} =$ [°]

Cohésion du sol : $c_{ef} =$ [kPa]

Angle de frottement actif : $\delta_{act} =$ [°]

Angle de frottement passif : $\delta_{pas} =$ [°]

— Pression au repos

Sol :

Coefficient de Poisson : $\nu =$ [-]

— Soulèvement hydraulique

Calcul soulèvem. hydraulique :

Poids volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} =$ [kN/m³]

— Module de réaction du sol de fondation (Ménard)

Module pressiométrique : $E_M =$ [MPa]

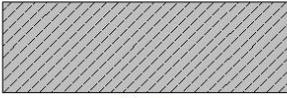
Coefficient rhéologique : $\alpha =$ [-]

Affichage

Catégorie des échantillons :

Chercher :

Sous-catégorie :

Echantillon : 

Couleur :

Arrière-plan :

Boite de dialogue pour saisie des paramètres des marnes compactes

2.1.5 Item Géométrie

La paroi en béton armé de 0.8m d'épaisseur et de 7.65 m de profondeur est ici définie.

Edition du tronçon ✕

Type de la paroi : Paroi rectangulaire en béton armé

Identification de la section : Mur en béton armé h = 0.80 m Personnaliser

Long. du tronçon : l = 7.65 [m]

— Géométrie —

Epaisseur de la paroi : h = 0.80 [m]

— Information —

A = 8.00E-01 [m²/m] **I = 4.27E-02 [m⁴/m]**

 Catalogue d'utilisateur

2.1.6 Item Matériau

Un béton C20/25 est choisi.

2.1.7 Item "Assignment"

On associe ici chaque couche du profil avec un des sols renseignés.

Assignment par le clic gauche :
Remblais argileux

Num.	Epaisseur [m]	Sol assigné	
1	2.00	Remblais argileux	
2	1.00	Limons	
3	4.00	Sables	
4	12.00	Marnes compactes	
5		Marnes compactes	

2.2 Première phase : Etat de contraintes initiales.

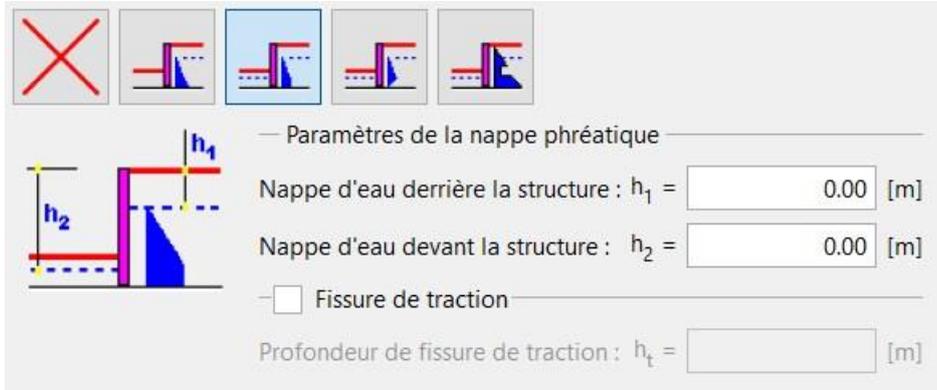
On reproduit le phasage de construction en supposant la paroi en place. Aussi, on commence avec un état de contraintes initiales.

2.2.1 Item "Excavation"

Pour cette étape l'excavation est donc nulle.

2.2.2 Item "Eau"

On définit la nappe à la surface. On choisit le cas permettant de définir les paramètres de la nappe devant et derrière la paroi.



— Paramètres de la nappe phréatique —

Nappe d'eau derrière la structure : $h_1 =$ [m]

Nappe d'eau devant la structure : $h_2 =$ [m]

Fissure de traction

Profondeur de fissure de traction : $h_t =$ [m]

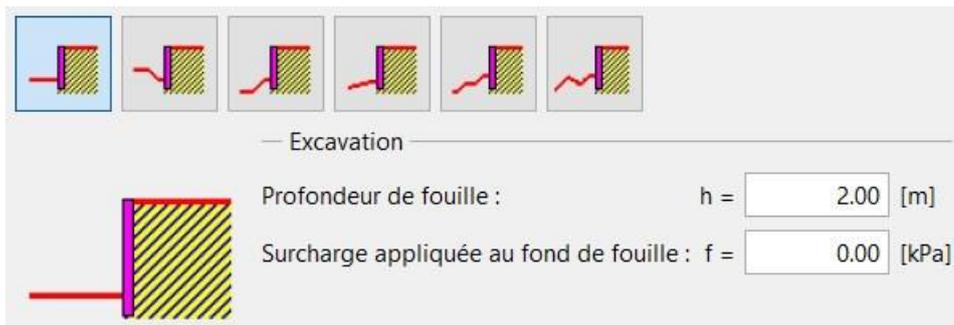
2.3 Seconde phase – Excavation à -2 m

On ajoute une nouvelle phase de construction.



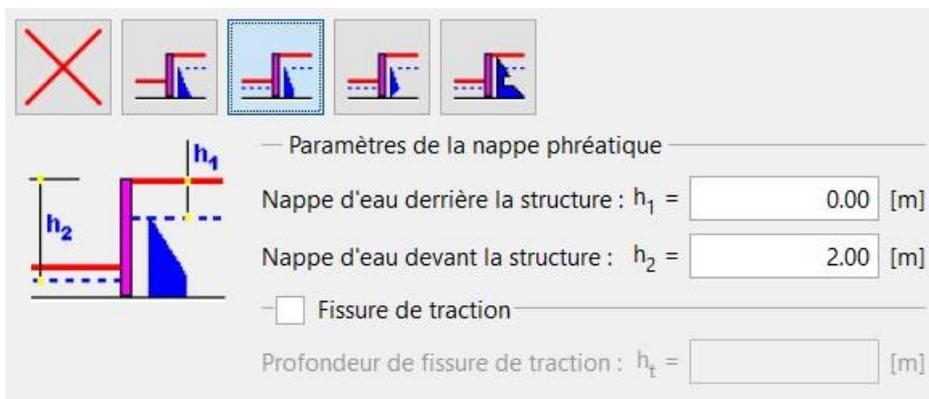
2.3.1 Item "Excavation"

On établit la profondeur de fouille à 2m.



2.3.2 Item "Eau"

On rabat la nappe au niveau du fond de fouille, donc à 2 m.



2.4 Troisième phase – Mise en place des tirants

On ajoute une nouvelle phase de construction.



2.4.1 Item "Ancrages"

Le fenêtre d'édition des ancrages est détaillée pour renseigner tout type de tirant.

On choisit la barre précontrainte pour pouvoir définir une longueur libre et une longueur scellée. On laisse la force de précontrainte nulle.

On notera que les résistances à la rupture et à l'arrachement sont des données précalculées pour pouvoir mener la vérification STR de l'ancrage (voir chapitre "Synthèse").

Edition de l'ancrage ✕

Type de tirant d'ancrage : barre précontrainte

Ligne de produits : utilisateur

Nom :

— Paramètres de l'ancrage —

Profondeur : $z =$ [m]

Longueur libre : $l =$ [m]

Long. du scellement : $l_k =$ [m]

Inclin. : $\alpha =$ [°]

Distance entre : $b =$ [m]

— Rigidité —

Type de saisie : saisir le diamètre

Diamètre : $d_s =$ [mm]

Module d'élast. : $E =$ [MPa]

Force précontrainte : $F =$ [kN]

— Résistance à la rupture —

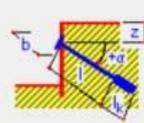
saisir $R_t =$ [kN]

— Résistance à l'arrachement du sol —

saisir $R_e =$ [kN]

— Résistance à l'arrachement du coulis de ciment —

saisir $R_c =$ [kN]



OK + ↑
OK + ↓
OK
Annuler

2.5 Quatrième phase – Excavation à -4 m

On ajoute une nouvelle phase de construction.



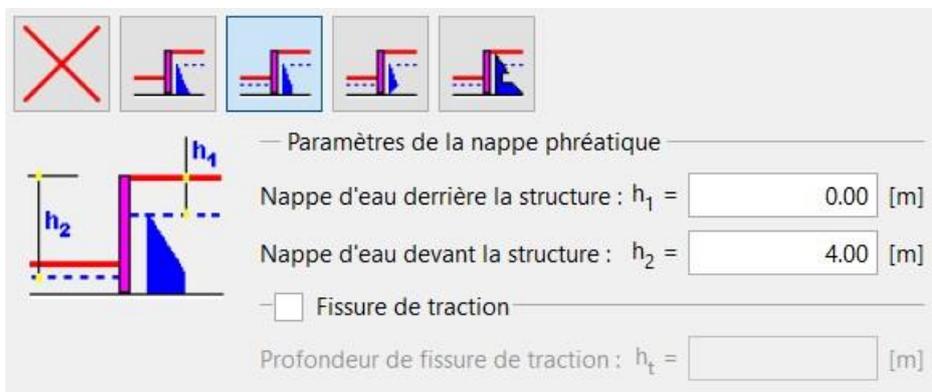
2.5.1 Item "Excavation"

On établit la profondeur de fouille à 4m.



2.5.2 Item "Eau"

On rabat la nappe au niveau du fond de fouille. Donc à 4 m.



2.6 Passage des calculs

En cliquant sur "Calculs", les quatre phases sont calculées. Leur affichage en vert signifie que le calcul s'est correctement déroulé (aucune instabilité rencontrée par exemple).



2.7 Résultats de la phase 4

Le cadre du bas affiche si le calcul a été réalisé et les principaux résultats à analyser.

Résultats

Le calcul a été effectué correctement.

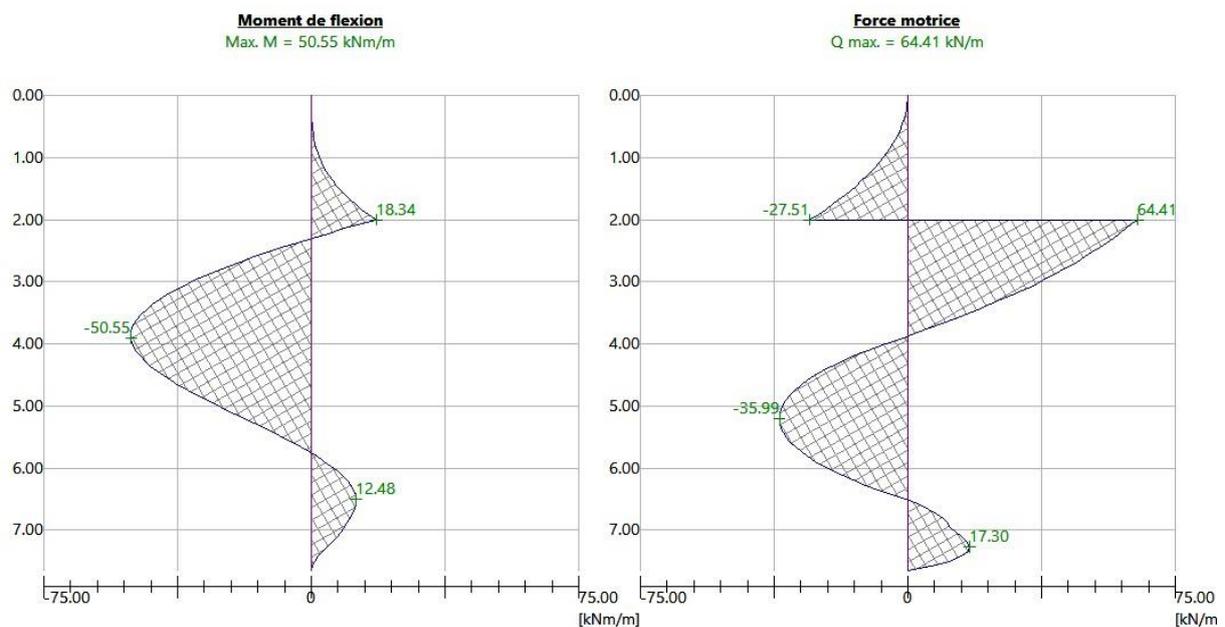
Intensité maximale des forces internes appliquées à la structure

Force motrice maximale = 64.41 kN/m
 Moment maximal = 50.55 kNm/m
 Déformation maximale = 10.3 mm

Forces des ancrages

Num.	Profondeur [m]	Déformation [mm]	Force de l'ancrage [kN]
1	2.00	-7.7	91.92

2.7.1 Affichage "Efforts internes"



3 CALCUL ELU 1

Par rapport au calcul précédent, il suffit de définir un nouveau jeu de paramètres.

3.1 Item "Paramètres"

Cliquer sur "Edition" pour régler les paramètres : pondération des actions par 1.35 et des résistances par 1.4.

Edition des paramètres de l'étude actuelle : Vérification des soutènements

Matériaux et normes | Calcul des pressions | Ancrages

Calcul de la pression active : Absi

Calcul de la pression passive : Absi

Méthode de calcul : pressions dépendantes

Calcul du séisme : Mononobe-Okabe

Module de réact. du sol de fond. : pressiomètre PMT

Réduire le module de réaction du sol de fondation pour la paroi berlinoise

Input different structure/soil friction angles for active and passive pressures.

Tassement du terrain : méthode parabolique

Méthode de vérification : calcul selon EN 1997

Approche de calcul : 2 - réduction de la charge et de la résistance

Situation de calcul permanente | Situation de calcul transitoire | Situation de calcul accidentelle | Situation de calcul au séisme

— Coefficient de réduction de la charge (F)

	Défavorable	Favorable
Charge permanente : $\gamma_G =$	1.35 [-]	1.00 [-]
Charge variable : $\gamma_Q =$	1.50 [-]	0.00 [-]
Action de l'eau : $\gamma_w =$	1.35 [-]	
Soulèvement hydraulique (HYD) : $\gamma_h =$	1.35 [-]	0.90 [-]

— Coefficient de réduction de la résistance (R)

Coefficient de réduction de la stabilité de l'ancrage : $\gamma_{Ris} =$ 1.10 [-]

Coefficient de réduction de la résistance du sol : $\gamma_{Re} =$ 1.40 [-]

Editer les paramètres de calcul du programme :

Stabilité des pentes

OK

Annuler

3.2 Passage des calculs

En cliquant sur "Calculs", les quatre phases sont calculées. Leur affichage en vert signifie que le calcul s'est correctement déroulé (aucune instabilité rencontrée par exemple).



3.3 Résultats de la phase 4

Le cadre du bas affiche si le calcul a été réalisé et les principaux résultats à analyser.

Ici les résultats en déformation n'ont pas de signification.

— Résultats

Le calcul a été effectué correctement.

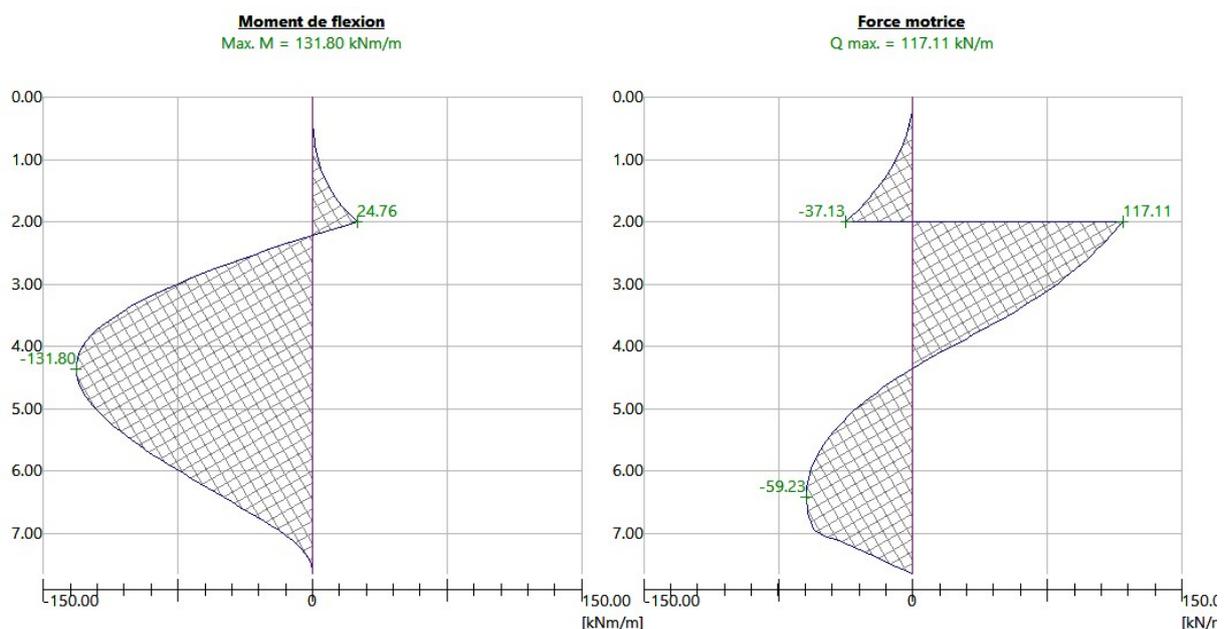
Intensité maximale des forces internes appliquées à la structure

Force motrice maximale = 117.11 kN/m
 Moment maximal = 131.80 kNm/m
 Déformation maximale = 27.8 mm

Forces des ancrages

Num.	Profondeur [m]	Déformation [mm]	Force de l'ancrage [kN]
1	2.00	-20.3	154.24

3.3.1 Affichage "Efforts internes"

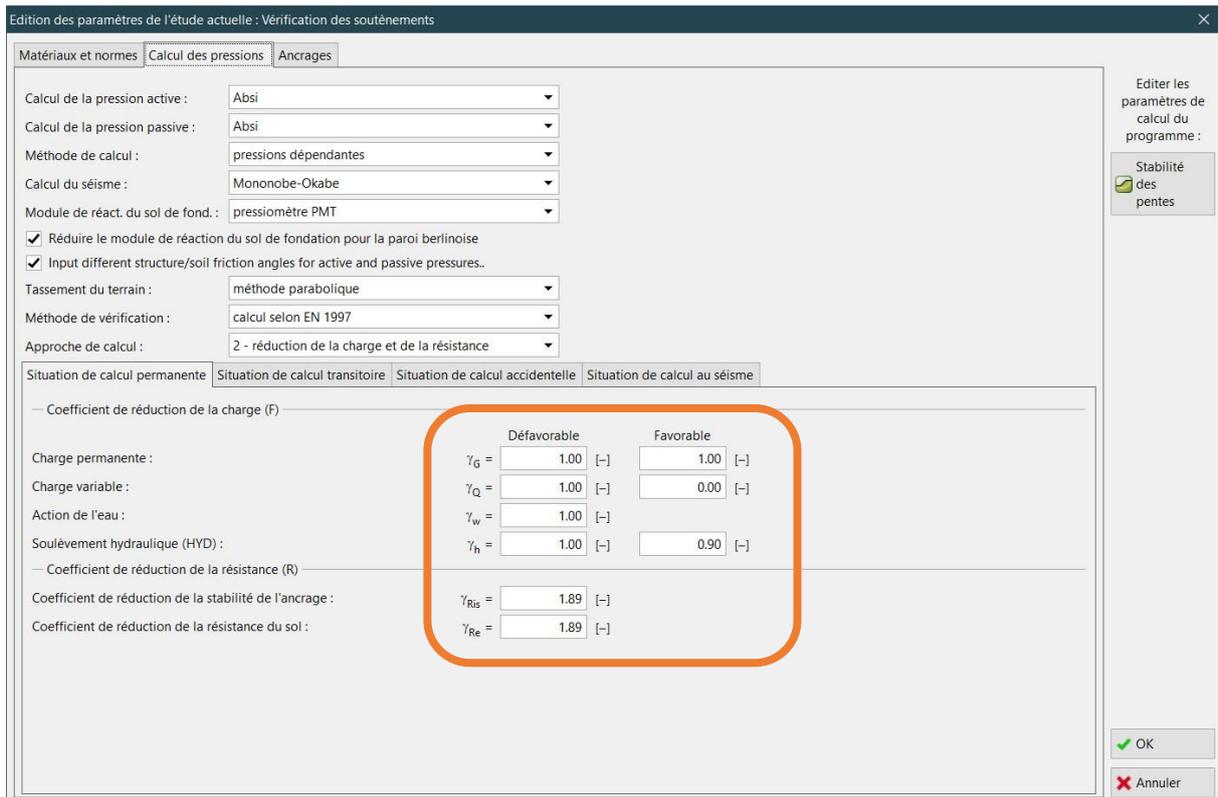


4 CALCUL ELU 2

Par rapport au calcul précédent, il suffit de définir un nouveau jeu de paramètres.

4.1 Item "Paramètres"

Cliquer sur "Edition" pour régler les paramètres : pondérations des résistances par $1.4 \times 1.35 = 1.89$.



Matériaux et normes | Calcul des pressions | Ancrages

Calcul de la pression active : Absi
 Calcul de la pression passive : Absi
 Méthode de calcul : pressions dépendantes
 Calcul du séisme : Mononobe-Okabe
 Module de réact. du sol de fond. : pressiomètre PMT

Réduire le module de réaction du sol de fondation pour la paroi berlinoise
 Input different structure/soil friction angles for active and passive pressures.

Tassement du terrain : méthode parabolique
 Méthode de vérification : calcul selon EN 1997
 Approche de calcul : 2 - réduction de la charge et de la résistance

Situation de calcul permanente | Situation de calcul transitoire | Situation de calcul accidentelle | Situation de calcul au séisme

— Coefficient de réduction de la charge (F)

	Défavorable	Favorable
Charge permanente :	$\gamma_G = 1.00$ [-]	1.00 [-]
Charge variable :	$\gamma_Q = 1.00$ [-]	0.00 [-]
Action de l'eau :	$\gamma_w = 1.00$ [-]	
Soulèvement hydraulique (HYD) :	$\gamma_h = 1.00$ [-]	0.90 [-]

— Coefficient de réduction de la résistance (R)

Coefficient de réduction de la stabilité de l'ancrage : $\gamma_{Ris} = 1.89$ [-]
 Coefficient de réduction de la résistance du sol : $\gamma_{Re} = 1.89$ [-]

OK | Annuler

4.2 Passage des calculs

En cliquant sur "Calculs", les quatre phases sont calculées. Leur affichage en vert signifie que le calcul s'est correctement déroulé (aucune instabilité rencontrée par exemple).



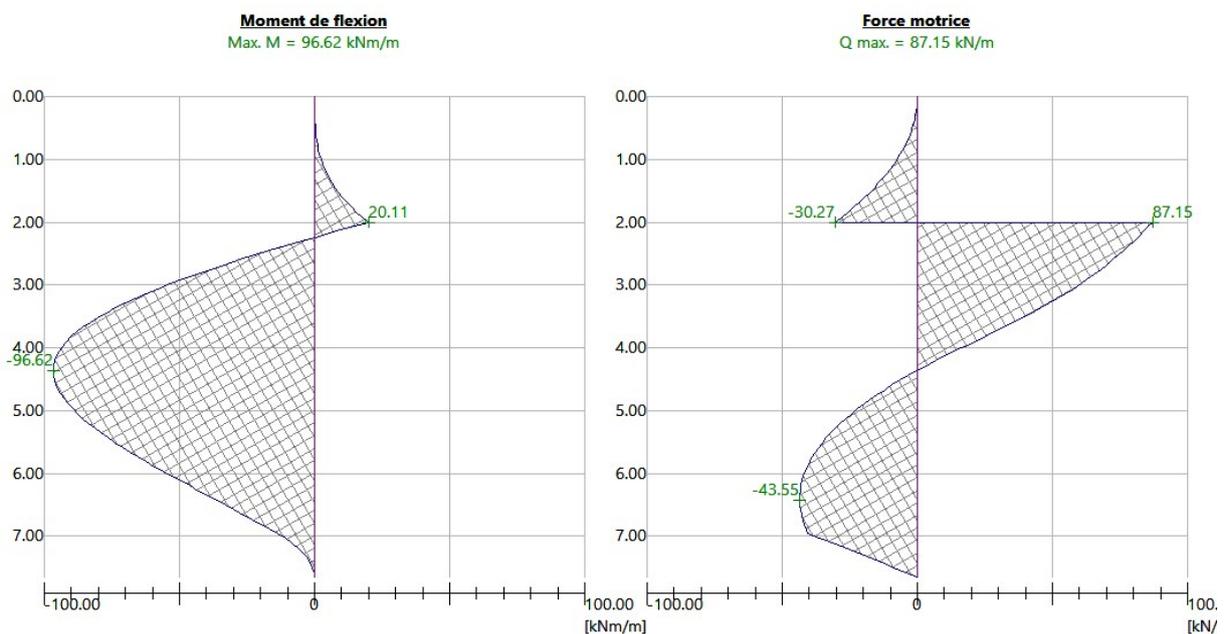
4.3 Résultats de la phase 4

Le cadre du bas affiche si le calcul a été réalisé et les principaux résultats à analyser.

Ici les résultats en déformation n'ont pas de signification.

Résultats			
Le calcul a été effectué correctement.			
Intensité maximale des forces internes appliquées à la structure			
Force motrice maximale = 87.15 kN/m			
Moment maximal = 96.62 kNm/m			
Déformation maximale = 19.5 mm			
Forces des ancrages			
Num.	Profondeur [m]	Déformation [mm]	Force de l'ancrage [kN]
1	2.00	-18.1	117.42

4.3.1 Affichage "Efforts internes"



5 SYNTHÈSE

5.1 Efforts dans l'écran et dans le tirant

		Moment (kN.m/ml)	Effort tranchant (kN/ml)	Effort de traction dans le tirant (kN/ml)
ELU 1		132	117	154
Référence		134	123	164
ELU2		97	87	117
Référence		99	90	121
ELS (E_k)	GEO	50.5	64.5	92
Référence		51.1	66	97
$E_{ELU} = 1.35 \times E_k$	STR	68	87	124
Référence		69	89	131

5.2 Vérification du rapport butée mobilisée / butée mobilisable (GEO)

En l'état du logiciel (version 2020), cette vérification doit être menée manuellement en exploitant les résultats du tableau de la note de calcul.

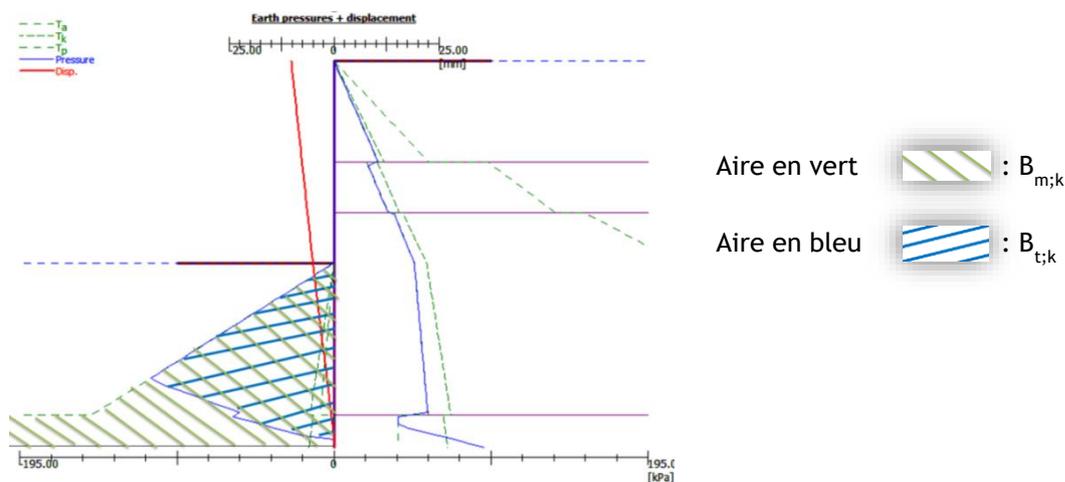


Diagramme des pressions calculées

Pour illustration, on mène ce calcul pour plusieurs fiches de paroi.

Hauteur de paroi	$B_{t;k}$ (kN/ml)	$B_{m;k}$ (kN/ml)	$B_{m;k} / B_{t;k}$	$B_{m;k} / B_{t;k} > 1.89?$
7.65	195.00	376.78	1.93	ok
7.6	189.20	362.51	1.92	ok
7.55	183.55	348.35	1.90	ok
7.5	186.76	334.30	1.79	non

5.3 Justification du tirant (STR)

5.3.1 Justification de la résistance interne

La charge appliquée au tirant est $P_d = 131$ kN

La résistance à la traction du tirant est : $R_{t,d} = (f_{y,k} \times A_g) / 1 = (500 \times 800 \cdot 10^{-6}) / 1 = 400$ kN

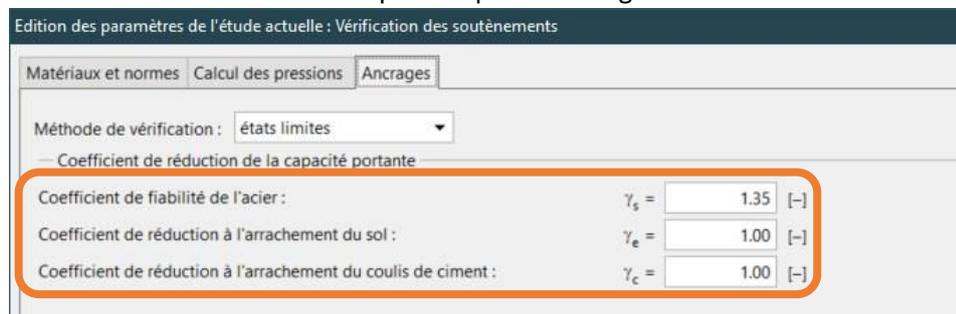
Ainsi on vérifie que $P_d < R_{t,d}$.

5.3.2 Justification géotechnique

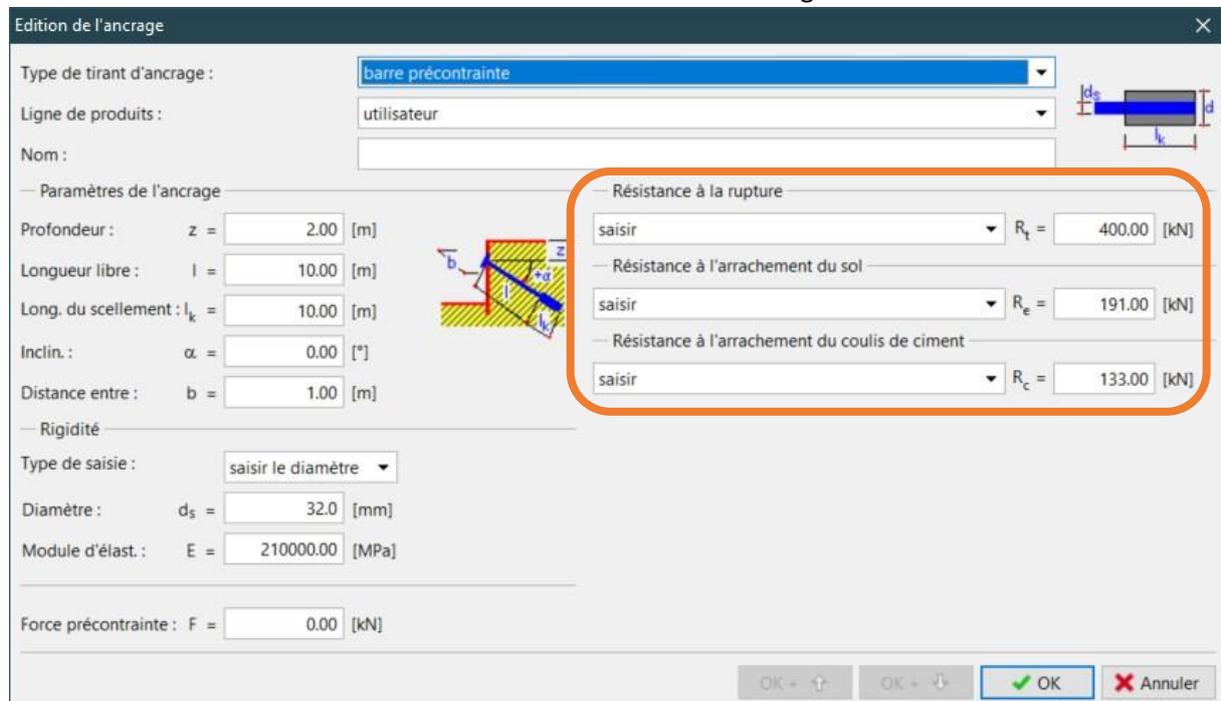
Pour cette vérification, on peut utiliser les résultats du calcul ELS ou utiliser le programme.

Pour utiliser le programme, il faut intervenir à 2 endroits :

- Définir les coefficients partiels pour l'ancrage.



- Définir les valeurs de résistance lors de l'édition de l'ancrage.



La justification des tirants est donnée comme hypothèse du document de référence :

- $R_{ELU;k} = 21 \text{ kN/ml}$
- $R_{ELS;k} = 16 \text{ kN/ml}$

D'où :

- $R_{ELU;d} = R_{ELU;k} / \gamma_{a;ELU} = 21 \times 10 / 1.1 = 191 \text{ kN} > 131 \text{ kN}$
- $R_{ELS;k} = R_{ELS;k} / \gamma_{a;ELS} = 16 \times 10 / 1.2 = 133 > 97 \text{ kN}$