K-Réa
Dimensionnement et vérification des écrans de soutènement

D. MANUEL TUTORIEL

D.1. Tutoriel 1 : Paroi berlinoise butonnée 3
D.1.1 Etape 1 : Saisie des données 4
D.1.2 Etape 2 : Définition du phasage 11
D.1.3 Etape 3 : Calculs et résultats 19
D.1.4 Annexe : Traitement de p_{max} 23

D.2. Tutoriel 2 : Fouille butonnée avec rabattement de nappe 24
D.2.1 Etape 1 : Coupe symétrique sans gradient 25
D.2.2 Etape 2 : Prise en compte du gradient 37
D.2.3 Etape 3 : Passage à un calcul double-écran 45
D.2.4 Etape 4 : Cas d'une fouille asymétrique 51

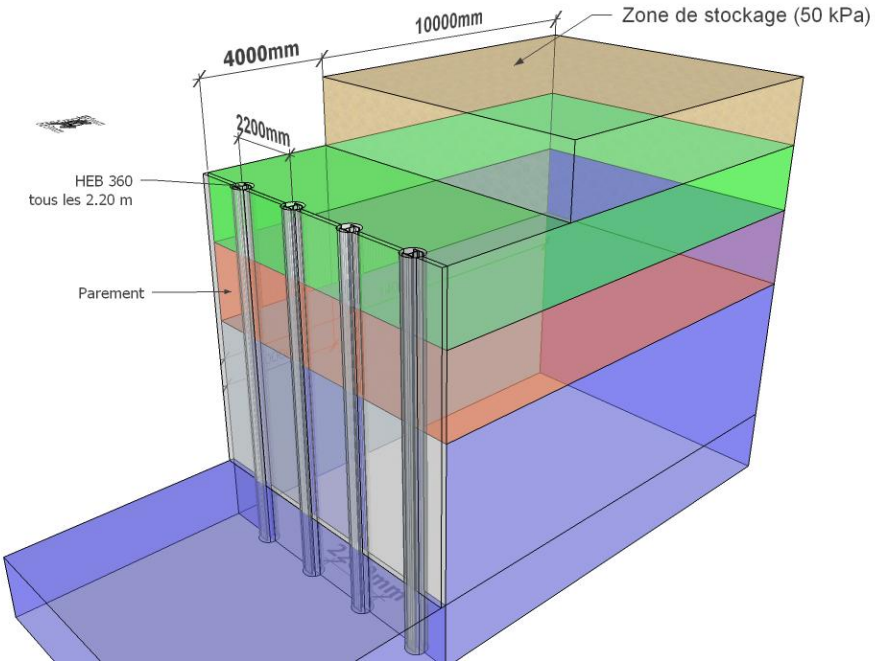
D.3. Tutoriel 3 : Fouille soutenue par écran auto-stable 55
D.3.1 Saisie des données 56
D.3.2 Définition du phasage 59
D.3.3 Calculs et résultats 61
D.3.4 Etude paramétrique 67

D.4. Tutoriel 4 : Fouille tirantée et stabilité du massif d'ancrage 74
D.4.1 Saisie des données 74
D.4.2 Définition du phasage 78
D.4.3 Calcul et résultats 82
D.4.4 Equilibre vertical 84
D.4.5 Stabilité du massif d'ancrage (Kranz) 85
D.4.6 Revue de la longueur libre des tirants 87

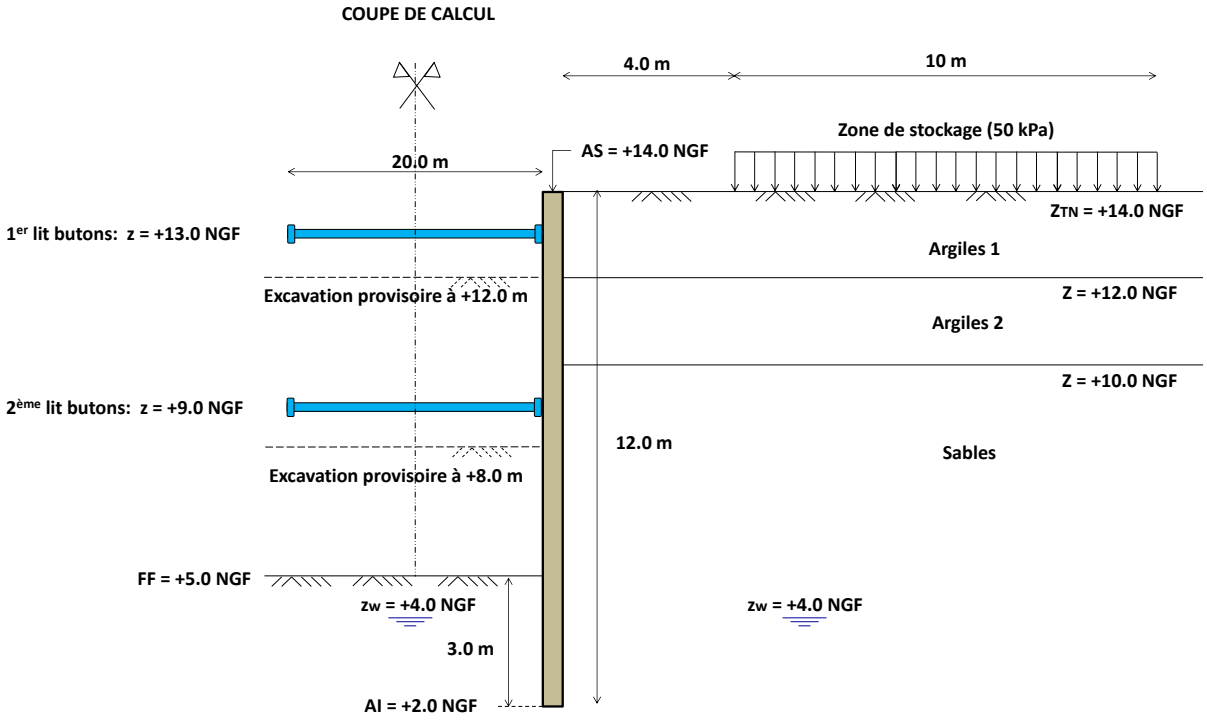
D.5. Tutoriel 5 : Aménagement d'un quai maritime 88
D.5.1 Saisie des données 89
D.5.2 Définition du phasage 92
D.5.3 Résultats 99

D.1. Tutoriel 1 : Paroi berlinoise butonnée

Nous allons étudier un écran discontinu de type paroi berlinoise. La stabilité de l'écran sera assurée par deux lits de butons.



Vue 3D du projet de soutènement



Coupe 2D du projet du soutènement

Le soutènement envisagé se trouve à 4 mètres d'une zone de stockage existante, qui peut être assimilée à une charge constante de 50 kPa sur une longueur de 10 mètres.

La modélisation de l'écran devra considérer une **phase initiale** pour prendre en compte cette charge préexistante avant sa construction.

Le soutènement est constitué de pieux circulaires en béton renforcés par un profilé métallique à l'intérieur de chaque pieu. Nous considérons que les profilés métalliques sont les seuls à reprendre les efforts internes de l'écran.

Les caractéristiques des pieux sont les suivantes :

- Diamètre = **0,62 m**
- Espacement = **2,20 m** (entraxe)
- Profilé métallique : **HEB 360**

Nous appliquerons en phase initiale les coefficients de réduction des poussées / butées pour prendre en compte le caractère discontinu de l'écran.
Le phasage comporte ensuite **3 phases d'excavation** avec la mise en place au fur et à mesure d'un blindage et de **2 niveaux de butons** : **HEB 320 espacés de 4,40 m**.

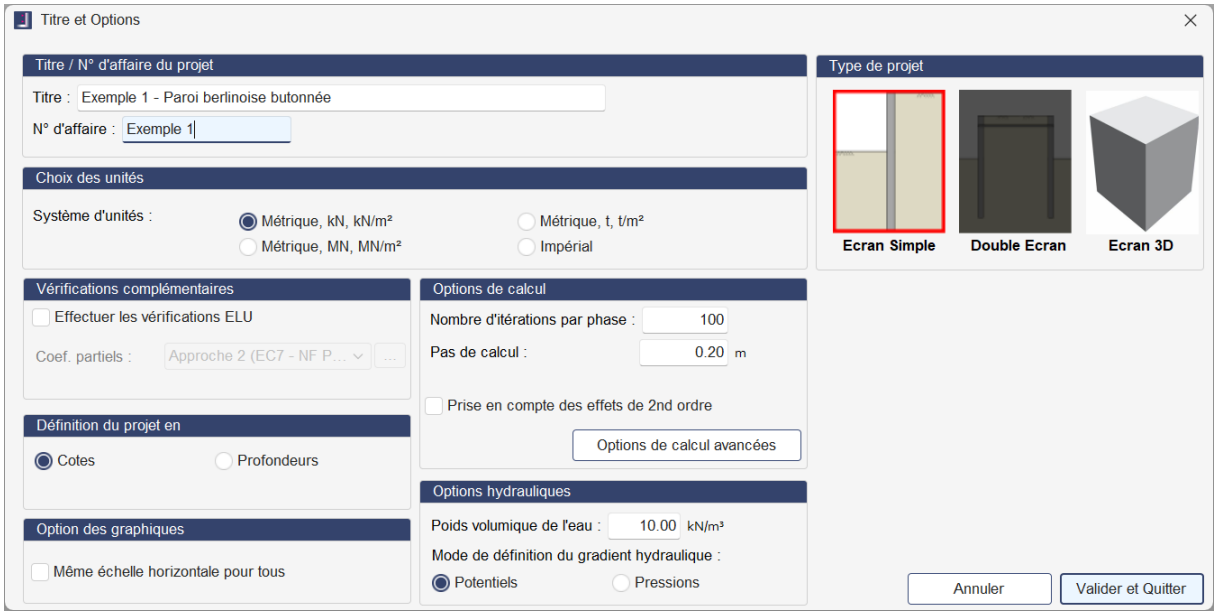
La coupe de sol est composée de trois couches de sol. Les caractéristiques des couches sont données dans la suite de l'exercice. Nous allons effectuer une étude sans vérifications à l'ELU selon un calcul MISS sans pondérations. Les vérifications à l'ELU seront abordées dans d'autres exemples.

D.1.1 Etape 1 : Saisie des données

Pour démarrer K-Réa :

- Double-cliquer sur l'icône **K-Réa**.
- Choisir le mode de protection adéquat, conserver la langue par défaut (**Français**) et cliquer sur **OK.**
- Choisir **Nouveau projet** pour accéder au formulaire **Titre et Options**.

D.1.1.1. Titre et options



- Dans le cadre **Type de projet** (à droite), sélectionner « Ecran simple ».
- Dans le cadre de **Titre / N° d'affaire du projet**, saisir le titre et le Numéro d'affaires de votre choix.
- Dans le cadre **Choix des unités** choisir le système d'unités de votre projet, en cochant « Métrique, kN, kN/m^2 ».
- Choisir **Définition du projet en** « Cotes », ce qui permet d'orienter l'axe vertical vers **le haut**.

- **Vérifications complémentaires** : laisser la case « Effectuer les vérifications ELU » décochée pour cet exemple.
- Dans le cadre **Option des graphiques**, cocher la case « Même échelle horizontale pour tous ».
- Dans le cadre **Options de calcul**, conserver les réglages par défaut : 100 itérations par phase de calcul et un pas de calcul de 0,2 m pour l'écran.
- Dans le cadre **Options hydrauliques** laisser le poids volumique de l'eau égale à 10,00 kN/m³.
- Cliquer sur le bouton **Valider et quitter**.
- K-Réa demande alors d'enregistrer le nouveau projet : définir le nom et le répertoire souhaités.

D.1.1.2. Définition des couches de sol

Il faut à présent définir les caractéristiques des 3 couches de sol du projet.

- Remplir les caractéristiques de la première couche de sol. Par défaut, la première ligne du tableau de synthèse est sélectionnée.
- Cliquer dans la case de saisie correspondant au **Niveau phréatique** et saisir z_w = +4 m.
- Saisir le « **Nom** » de la première couche de sol : Argiles 1.
- Indiquer le **Niveau du toit de la couche** z = +14 m.

Répéter cette opération pour saisir **γ, γ_d, φ, c**, **δ_a/φ**, **δ_p/φ** et **p_{max}** dont les valeurs sont indiquées dans le tableau récapitulatif suivant :

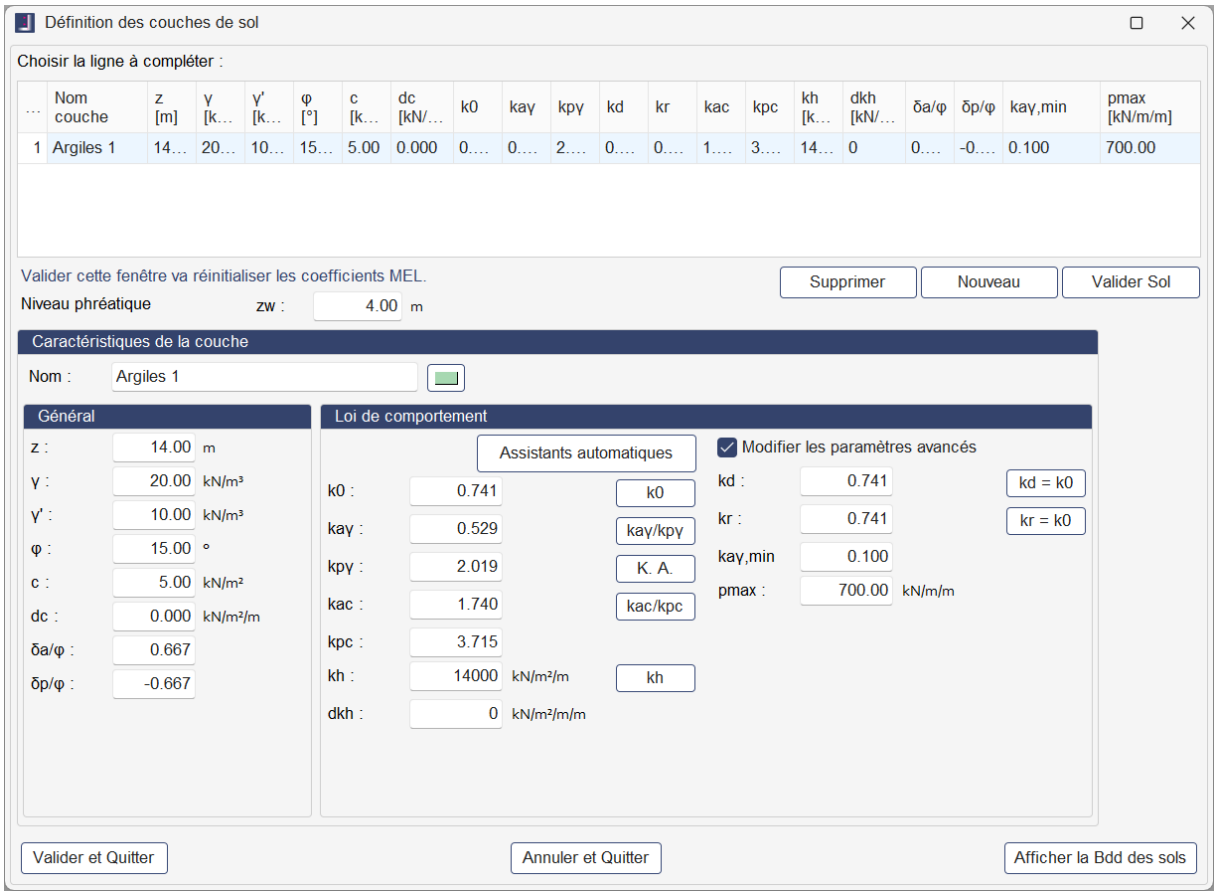
Nom de Couche	z (m)	γ (kN/m³)	γ' (kN/m³)	φ (°)	c (kN/m²)	dc (kN/m²/m)	δ_a/φ (-)	δ_p/φ (-)	p_{max} (kN/m/m)
Argiles 1	14	20	10	15	5	0	+0,667	-0,667	700

Les valeurs de δa/φ et δp/φ correspondent à :

- Une inclinaison à +2/3 φ des efforts de poussée (vers les bas)
- Une inclinaison à -2/3 φ des efforts de butée (vers le haut)

La valeur de dc correspond à l'augmentation de la cohésion avec la profondeur.
Dans cet exemple, nous considérons que la cohésion est constante sur la hauteur de la couche (dc = 0).

L'écran suivant illustre celui de K-Réa à la suite de ces opérations :

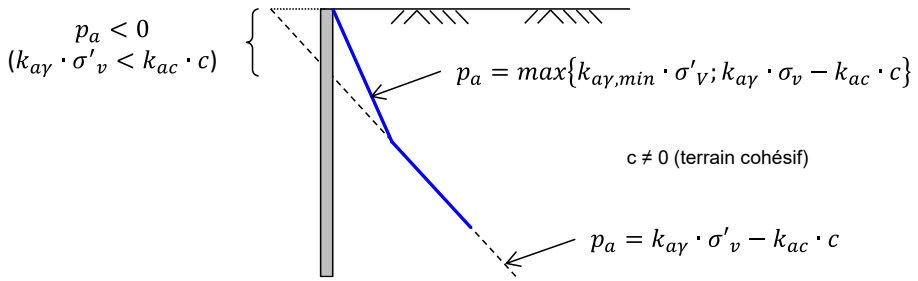


Cocher la case Modifier les paramètres avancés.
Pour compléter les coefficients k_0, $k_{a\gamma}$, $k_{p\gamma}$, k_{ac}, k_{pc}, k_d, k_r, nous allons utiliser ici les assistants automatiques :

- Cliquer sur le bouton **Assistant automatiques**

Ces différentes valeurs sont alors remplies selon les principes suivants :

- **k_0** est calculé par la formule de Jaky, avec Roc = 1, β = 0 et en tenant compte des caractéristiques déjà saisies ci-dessus.
- **$k_{a\gamma}$** est calculé via l'assistant "Tables de Kérisel et Absi" - Poussée, milieu pesant, sans cohésion, sans surcharge, avec λ = 0 et β/φ = 0 (terrain horizontal) et en tenant compte des caractéristiques déjà saisies ci-dessus.
- **$k_{p\gamma}$** est calculé via l'assistant "Tables de Kérisel et Absi" - Butée, milieu pesant, sans cohésion, sans surcharge, avec λ = 0 et β/φ = 0 et en tenant compte des caractéristiques déjà saisies ci-dessus.
- **k_d = k_r = k_0**
- **k_{ac}** et **k_{pc}** (coefficients appliqués sur la valeur de la cohésion) sont obtenus grâce à l'assistant correspondant.
- **$k_{a\gamma,min}$** correspond au coefficient de poussée minimale exigée par la NF P 94-282. La valeur est par défaut égale à 0,1 pour prendre en compte une contrainte horizontale de poussée d'au moins 10% de la contrainte verticale effective. Ceci permet de prendre une poussée minimale non nulle dans le cas de sols cohésifs (notre cas).



- **p_{max}** représente la valeur maximale admissible de la pression du sol. Dans cet exemple, elle a un rôle important. Sa valeur bornera la pression limite de butée admissible du sol conformément à la norme NF P 94-282 Annexe B.3.6. Elle correspond à la pression de fluage (p_f) ou la pression limite (p_l) selon le type de calcul (ELS ou ELU respectivement).
- Dans cet exemple, laisser la valeur de **dc** = 0.

- Il ne reste plus qu'à définir la valeur de **k_h** et de son incrément. Pour cela, entrer la valeur de 14 000 kN/m²/m pour **k_h** (cette valeur n'a pas été déterminée ici par un assistant mais est supposée connue dans le cadre de cet exercice). Cliquer ensuite dans la case **dk_h** pour saisir la valeur de 0 (k_h constant).
- Afin d'afficher la synthèse des caractéristiques de cette couche de sol, cliquer sur le tableau de synthèse.
- Nota : dans cette boîte de dialogue, le fait de cliquer sur **Valider et quitter** validera vos saisies, mais si vous quittez cette boîte de dialogue d'une autre façon, vos saisies seront annulées.

- Saisir de la même manière les deux autres couches de sol en cliquant sur les boutons **Valider Sol** puis **Nouveau** et en vous aidant du tableau récapitulatif suivant :

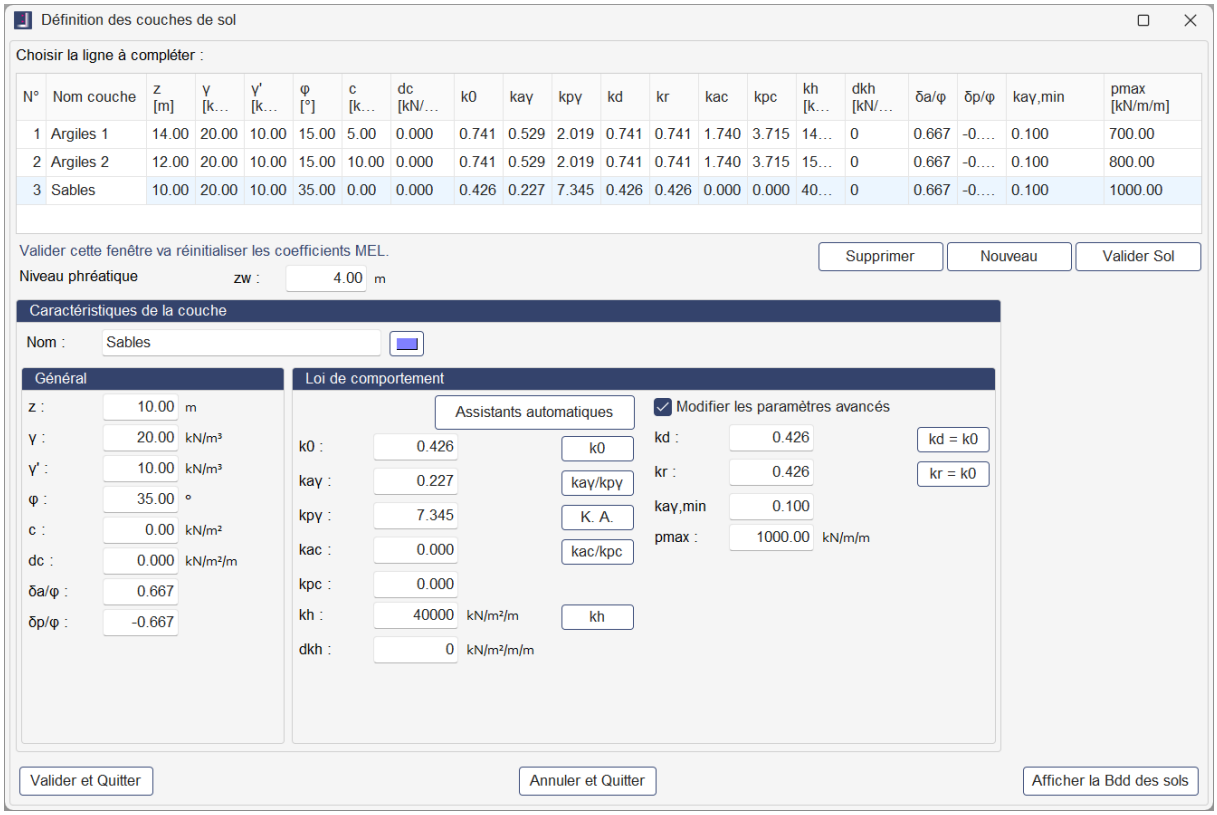
Couche	z (m)	γ (kN/m³)	γ' (kN/m³)	φ (°)	c (kN/m²)	dc (kN/m²/m)	δ_a/φ (-)	δ_p/φ (-)	p_{max} (kN/m/m)
Argiles 1	14	20	10	15	5	0	+0,667	-0,667	700
Argiles 2	12	20	10	15	10	0	+0,667	-0,667	800
Sables	10	20	10	35	0	0	+0,667	-0,667	1 000

Utiliser ensuite les assistants de K-Réa pour calculer les paramètres permettant de constituer la loi de comportement de chaque couche.

Les paramètres à obtenir à l'aide des assistants sont les suivants.

Couche	k_0 (-)	$k_{a\gamma}$ (-)	$k_{p\gamma}$ (-)	k_{ac} (-)	k_{pc} (-)	k_h (kN/m²/m)	dk_h (kN/m²/m/m)	k_d	k_r	$k_{a\gamma,min}$
Argiles 1	0,741	0,529	2,019	1,740	3,715	14 000	0	0,741	0,741	0,100
Argiles 2	0,741	0,529	2,019	1,740	3,715	15 000	0	0,741	0,741	0,100
Sables	0,426	0,227	7,345	0	0	40 000	0	0,426	0,426	0,100

L'écran obtenu est alors le suivant :



Cliquer sur **Valider et quitter**.

Pour consulter ou modifier les couches de sol ultérieurement, cliquer sur Menu Données, puis sur Définition des couches de sol.

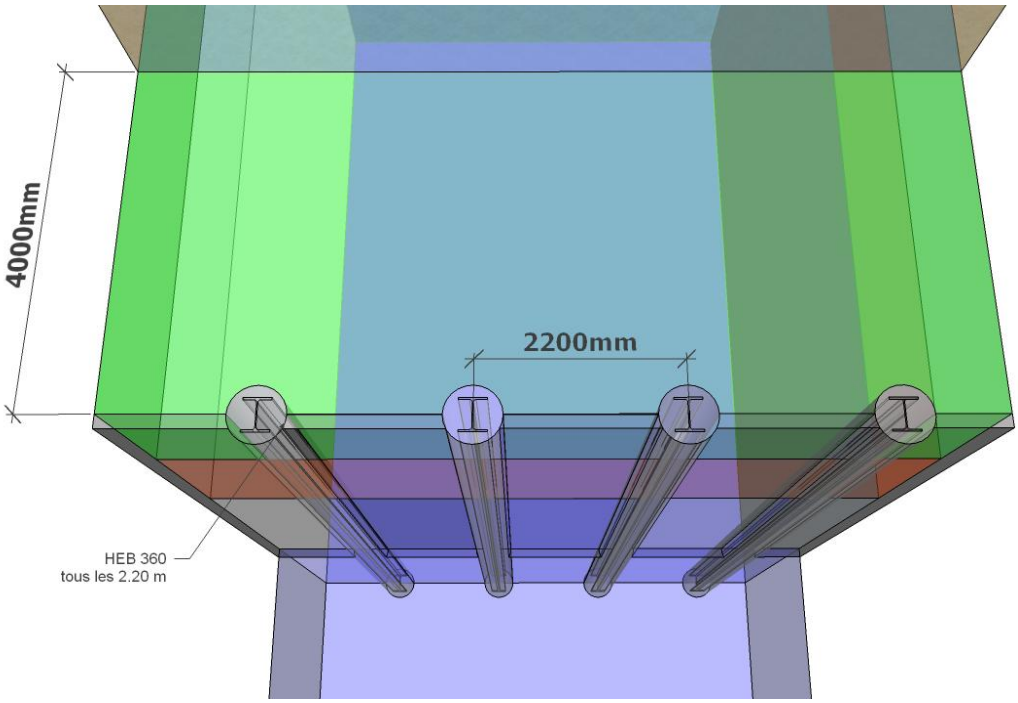
D.1.1.3. Définition de l'écran

- Cotes de l'écran :

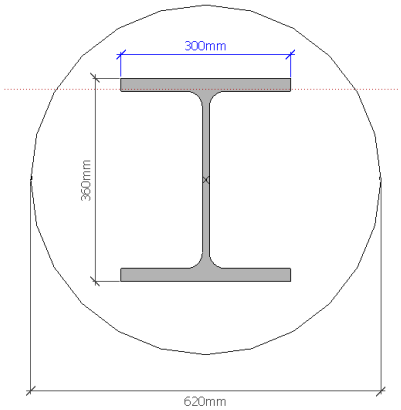
Le niveau supérieur de l'écran est au niveau du TN, soit z_0 = +14,0 m.
Le niveau inférieur de l'écran est à la cote z_{base} = +2,0 m.

- Produit d'inertie de l'écran (EI) :

Le produit d'inertie correspond à celui de profilés métalliques HEB 360 espacés tous les 2,20 m, puisque nous considérons qu'ils sont les seuls à reprendre les efforts internes de l'écran.
L'espacement des profilés est de 2,20 m (entraxe).



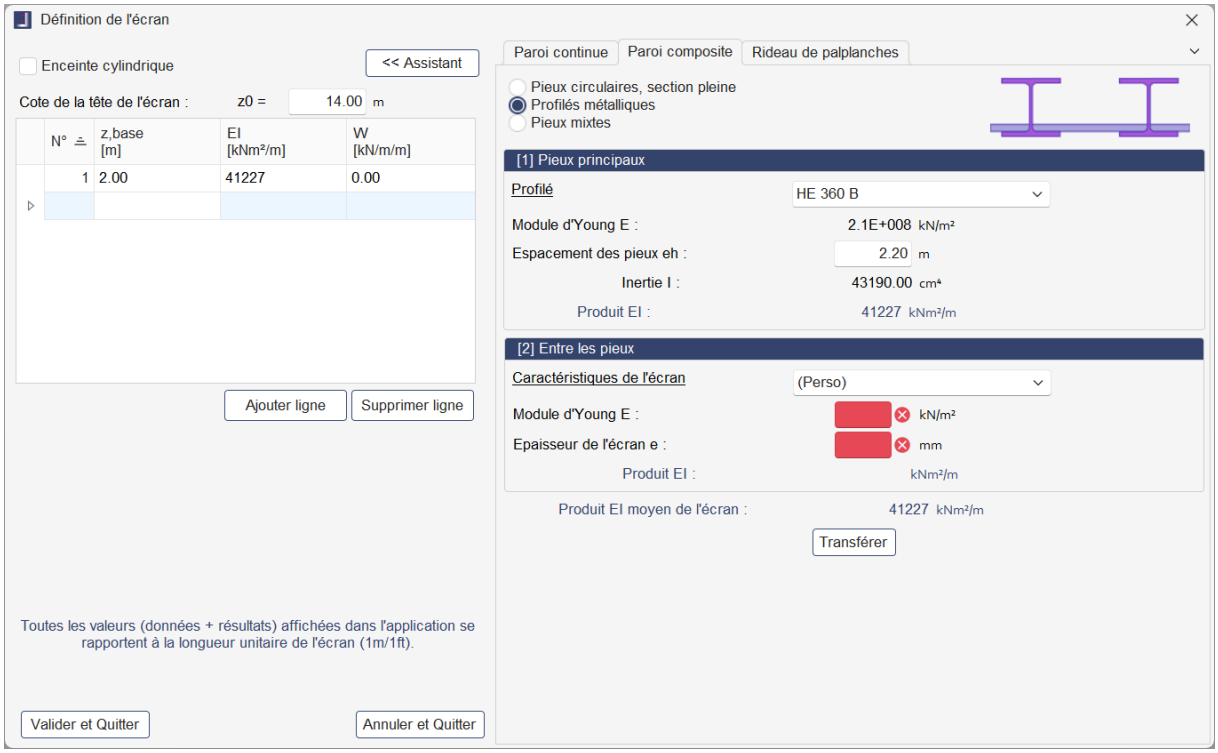
Vue en plan du soutènement depuis le côté fouille



Vue en plan d'un pieu 620 mm renforcé par un profilé HEB360

Définition de l'écran avec K-Réa :

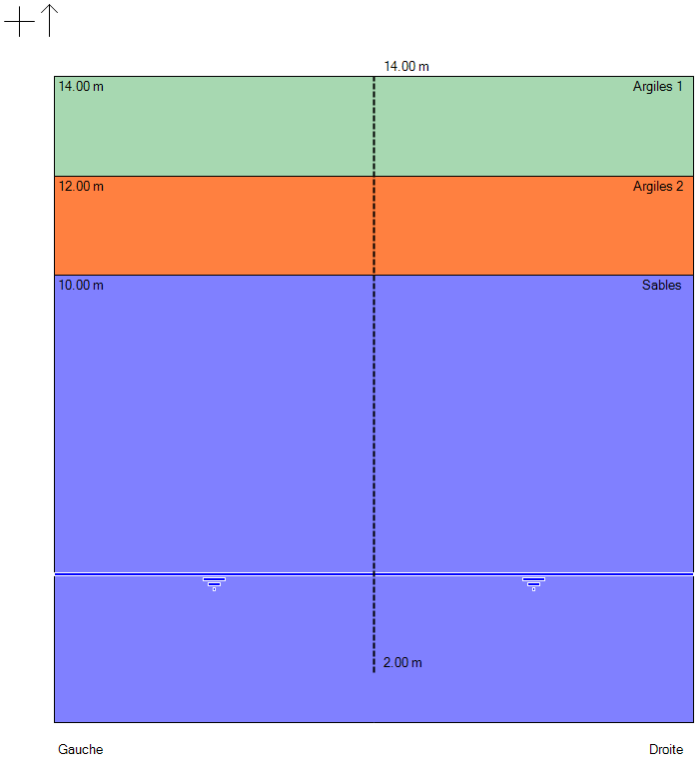
- Saisir le niveau supérieur de l'écran z_0 = +14,0 m.
- Cliquer sur la première ligne du tableau (correspondant à la première section d'écran à définir, qui sera en l'occurrence la seule pour cet exemple), saisir dans la première colonne la base de la section, soit ici la cote z_{base} = +2,0 m.
- Cliquer ensuite sur le bouton **Assistant** pour déterminer le produit EI des profilés :
  - Choisir l'onglet **Paroi composite**, puis sélectionner « Profilés métalliques ».
  - Dans la liste déroulante de profilés, choisir HE 360 B.
  - Saisir ensuite l'espacement horizontal (entraxe) des profilés 2,20 m.
  - Nous n'allons pas tenir compte de l'inertie apportée par le blindage entre les profilés et laissons donc vides les zones de saisie correspondantes.
- Cliquer sur **Transférer** puis quitter l'assistant.



Enfin, cliquer sur **Valider et quitter** pour prendre en compte les valeurs saisies et les voir apparaître avec la représentation graphique des données initiales du projet. Pour modifier les caractéristiques de la paroi ultérieurement, cliquer sur le menu **Données**, puis sur **Définition de l'écran**.

D.1.2 Etape 2 : Définition du phasage

La fenêtre principale de K-Réa affiche à présent la phase initiale du projet avec la représentation des couches de sol et de la paroi.



Il convient à présent de définir les actions à considérer dans chaque phase de construction.

Ces actions sont récapitulées dans le tableau ci-dessous à partir du phasage qui a été retenu :

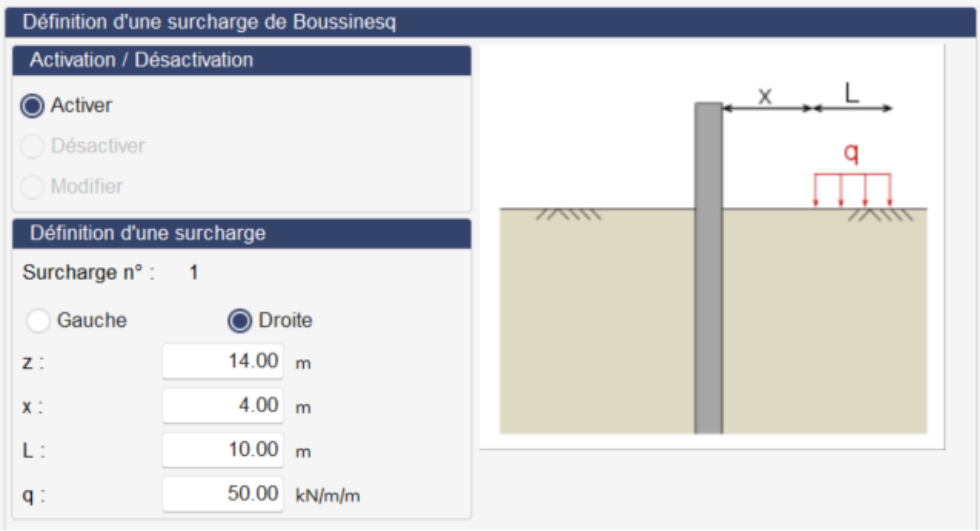
PHASE	ACTIONS
Initiale Avant travaux	• Surcharge de Boussinesq de 50 kN/m/m à 4 mètres à l'arrière de l'écran sur une largeur de 10 mètres. • Poussée et butée réduites sur toute la hauteur de l'écran.
Phase 1 Excavation	• Excavation intermédiaire avec pose de blindage à +12,0 m.
Phase 2 1er lit butons + Excavation	• Pose d'un lit de butons horizontaux (HEB 320 tous les 4,40 m d'entraxe) non pré-chargés à +13,0 m, soit $K_{lit\ butons}$ = 76 984 kN/m/m (travail autorisé uniquement en compression) • Excavation intermédiaire avec pose de blindage jusqu'à +8,0 m.
Phase 3 2ème lit butons + Excavation au FF	• Pose d'un buton à +9,0 m (mêmes caractéristiques mécaniques et géométriques que le lit de butons précédent). • Excavation au fond de fouille avec pose de blindage jusqu'à +5,0 m.

D.1.2.1. Phase initiale

La première action à définir en phase initiale est une **Surcharge de Boussinesq** pour bien prendre en compte l'existence de la zone de stockage à l'arrière de l'écran avant la construction de celui-ci.

Nous définissons une surcharge de Boussinesq de la manière suivante :

- Dans le cadre « Choix des Actions », Catégorie « Chargement sur le sol et l'écran », La liste déroulante permet de sélectionner l'action « Surcharge de Boussinesq ». Un clic sur le bouton « Ajouter l'action » la fera apparaître dans la liste des actions de la phase initiale, dans la partie droite de la fenêtre.
- Placer la surcharge à « Droite ».
- Saisir les valeurs suivantes :
  - z = + 14,0 m
  - x = 4 m (à l'arrière de l'écran)
  - L = 10 m (largeur d'application de la surcharge)
  - q = 50 kN/m/m



Il convient ensuite de définir l'action **Poussée réduite**, qui permettra de prendre en compte des contraintes de poussée et butée réduites sur l'écran, du fait que celui-ci est discontinu.

Cette action sera par la suite progressivement « annulée » pendant le phasage, au fur et à mesure de la pose du blindage. Le blindage ayant pour effet de rendre l'écran continu, les poussées et butées seront à nouveau prises en compte complètement sur la hauteur où l'écran est continu.

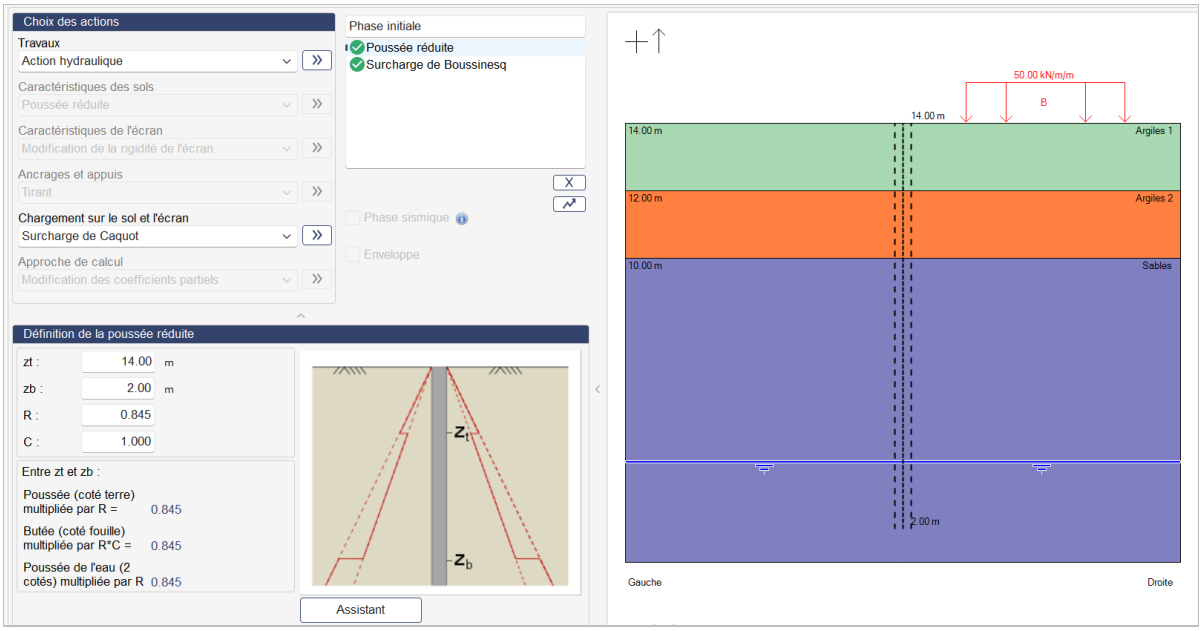
Pour définir cette action :

Sélectionner **Poussée réduite** dans le menu déroulant des actions « Caractéristiques des sols » de la phase initiale. Cliquer sur le bouton « Ajouter l'action ».

Dans le cadre « Définition de la poussée réduite », compléter avec les informations suivantes :

z_t = +14,0 m	R = 0,845
z_b = +2,0 m	C = 1

Cette action est représentée avec un trait pointillé noir de part et d'autre de l'écran.



Toutes les actions de la phase initiale sont à présent définies.
Pour créer une nouvelle phase de calcul et poursuivre la saisie des données du phasage, cliquer sur **Ajouter après** dans la partie de gestion de phasage, partie gauche de la fenêtre. Un nouvel item apparaît pour cette nouvelle phase. Aucune action n'étant encore définie pour cette nouvelle phase, la liste des actions est vide et sa représentation graphique est la même que celle de la phase précédente.

D.1.2.1.1. *Comment déterminer la largeur réduite de calcul de la poussée limite et de la butée limite d'après la norme NF P 94 282 pour un écran discontinu ?*

- Largeur réduite de calcul de la poussée limite (**NF P 94 282 Annexe B**) :

$$\mathbf{L_a} = \beta \times D = 3 \times 0{,}62 \text{ m} = \mathbf{1{,}86 \text{ m}}$$

Où : β = coefficient d'épanouissement = 1 + 2 x D / D = 3 (sol frottant et cohérent)
D = diamètre équivalent du profilé pris égale au diamètre du pieu

- Largeur réduite de calcul de la butée limite (**NF P 94 282 Annexe B**) :

$$\mathbf{L_b} = L_a = \mathbf{1{,}86 \text{ m}}$$

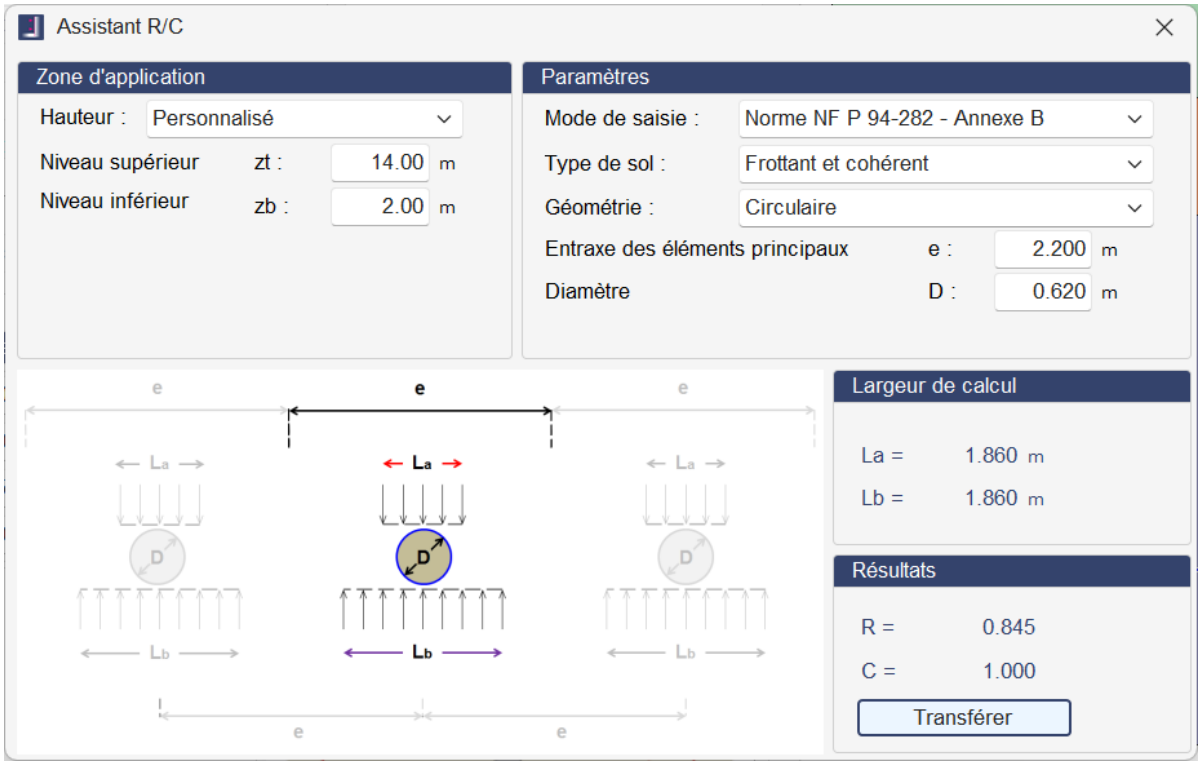
<u>Calcul de R et C</u> :

Dans K-Réa, nous imposerons ces largeurs de calcul de la poussée et de la butée limites à l'aide des coefficients réducteurs R et C. Ils s'appliquent directement sur les valeurs théoriques des pressions Pa et Pb calculées pour un écran continu. Ils seront appliqués sur la hauteur comprise entre z_t et z_b.

Coefficient réducteur de la poussée limite : **R** = L_a / e = 1,86 m / 2,20 m = **0,845**

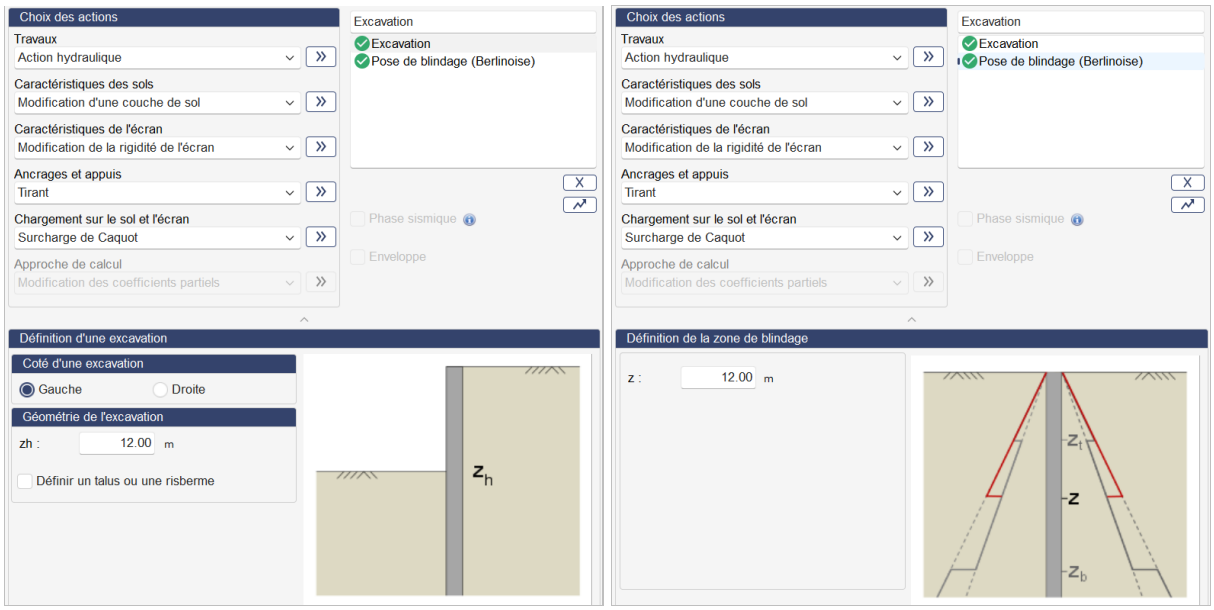
Coefficient réducteur de la butée limite : R x C = L_b / e = 1,86 m / 2,20 m = 0,845, d'où **C = 1** (même largeur réduite de calcul pour la poussée et la butée limites).

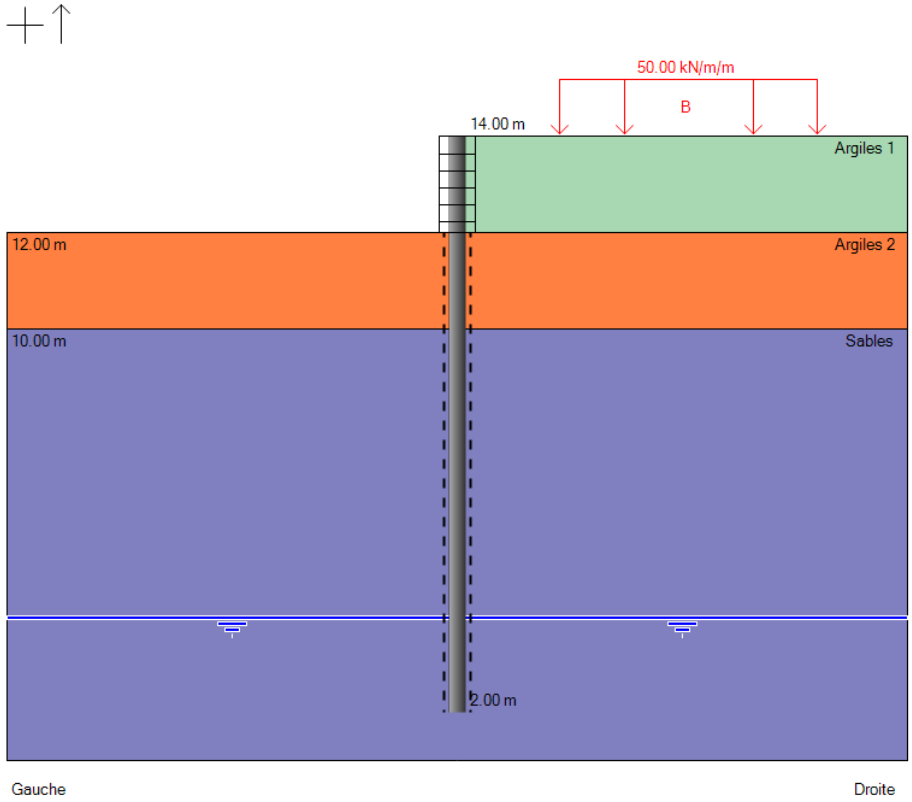
Utilisation de l'assistant :



D.1.2.2. Phase 1

- Dans le cadre Choix des actions, Catégorie « Travaux », choisir l'option **Excavation**. **Ajouter l'action** et saisir le niveau de l'excavation, à gauche : z_h = +12,0 m.
- Dans le cadre Choix des actions, Catégorie « Travaux », choisir l'option **« Pose de blindage (Berlinoise)** ». Transférer » l'action et saisir la base du blindage : z = +12,0 m.





D.1.2.3. Phase 2

Pour créer cette nouvelle phase de calcul et poursuivre la saisie des données du phasage, cliquer sur **Ajouter une phase**.

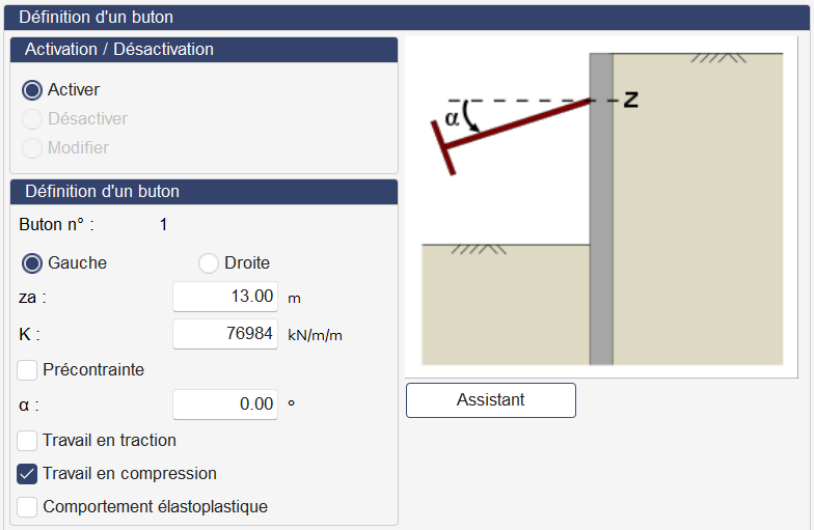
La première action de la deuxième phase est la pose d'un Buton :

- Dans le cadre Choix des actions, Catégorie « Ancrage et appuis », sélectionner l'action « **Buton** » et transférer l'action.
- Dans le cadre de définition de l'action, remplir les informations suivantes :
  - « **Activer** » un nouvel ancrage à « gauche »
  - z_a = +13,0 m
  - Supposons des butons **HEB 320 de 4,4 mètres d'entraxe**.
  - Le module de Young de l'acier est de 210 GPa. Leur section est de 16 130 mm². La fouille est supposée parfaitement symétrique de 20 m de largeur, la longueur utile sera donc la moitié de la largeur de la fouille : Lu = 10 m.
  - La raideur K sera de :

$$K_{lit\ buton} = E \times S / L_u / Esp$$

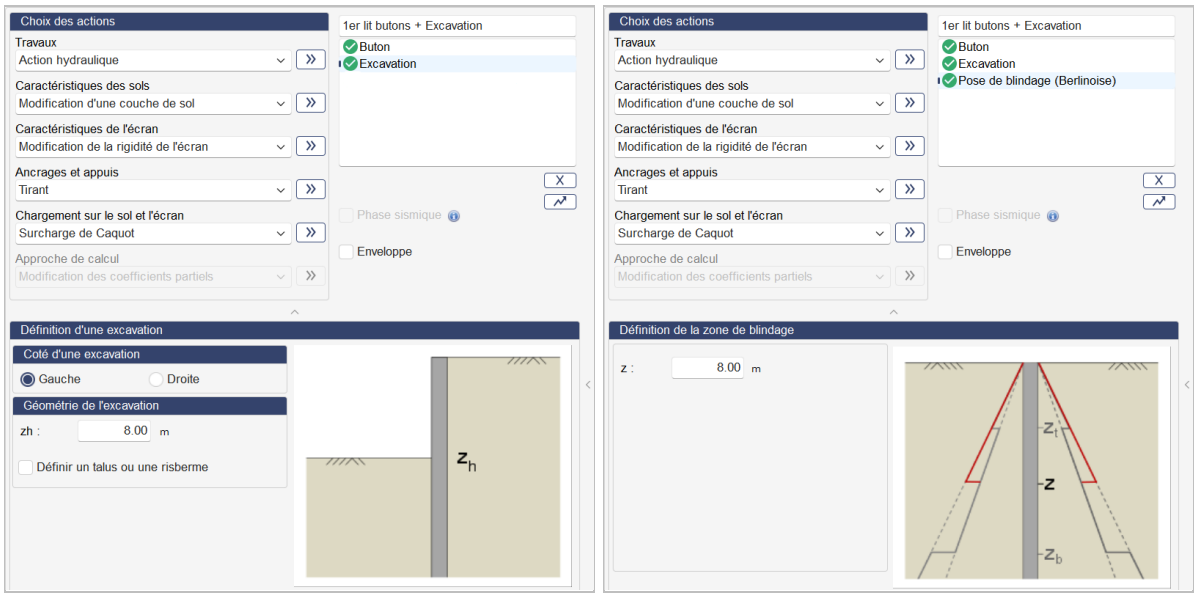
$$= 2{,}1 \times 10^{8}\ kN/m^2 \times 16\ 130 \times 10^{-6}\ m^2 / 10\ m / 4{,}4\ m = 76\ 984\ kN/m/m$$

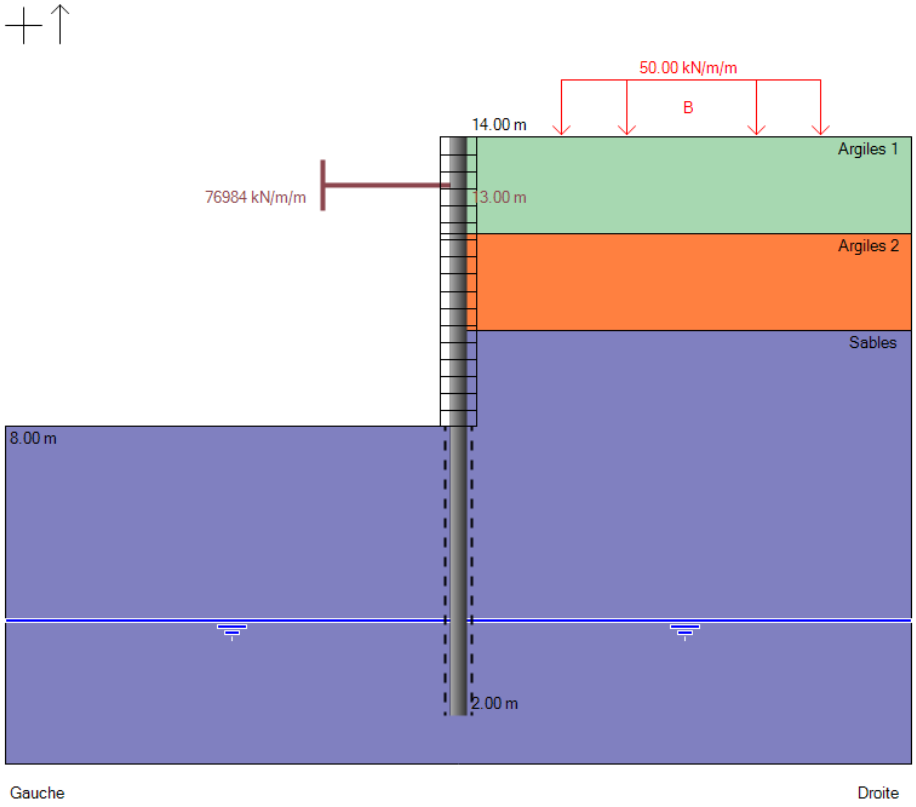
  - Pas de précontrainte dans notre cas : laisser la case décochée
  - Nous considérons une inclinaison nulle du buton : α = 0°
  - Laisser uniquement cochée la case « Travail en compression » (le buton ne sera pas autorisé à travailler en traction).



La deuxième action de la 2ème phase est une excavation avec pose de blindage. Pour la modéliser, il faut utiliser deux actions : l'action **Excavation** suivie d'une action de **Pose de blindage** :

- Définir l'action **Excavation**, saisir le niveau du fond de fouille à +8,0 m.
- Appliquer ensuite l'action **Pose de blindage (berlinoise)** et saisir les paramètres nécessaires à sa définition, à savoir la cote du pied de la pose de blindage à la fin de la phase de fouille (ici +8,0 m, valeur proposée par défaut). Sur la partie haute de l'écran (entre la cote +8,0 et la tête de l'écran), l'écran est donc considéré comme continu et les coefficients R et C ne s'appliquent pas sur cette partie.





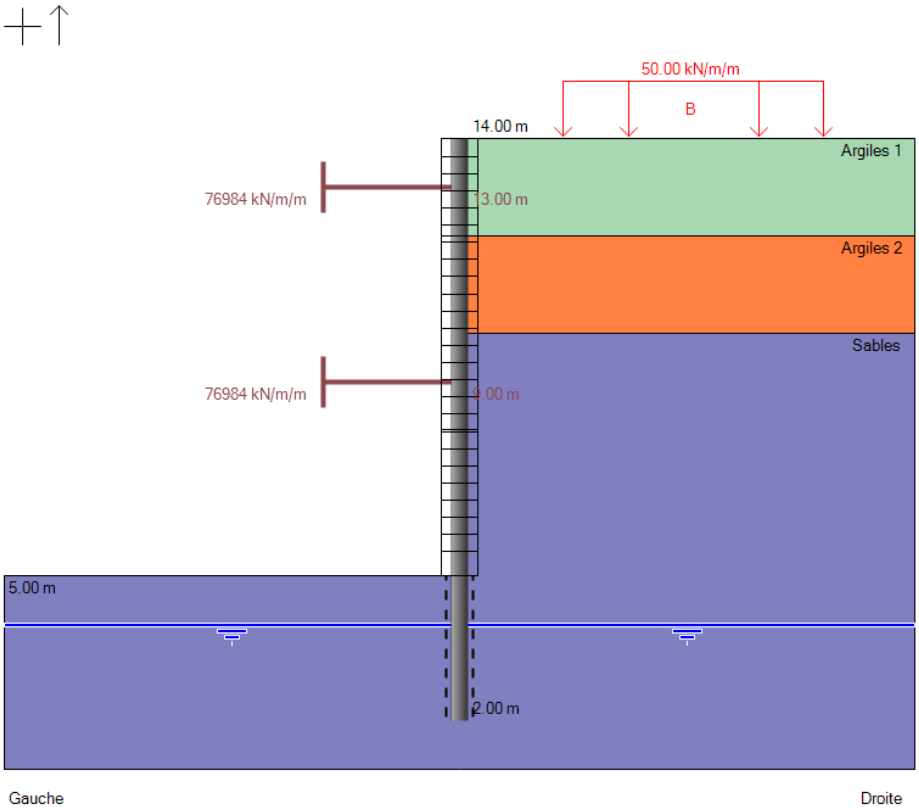
D.1.2.4. Phase 3

Pour créer cette nouvelle phase de calcul et poursuivre la saisie des données du phasage, cliquer sur **Ajouter une phase**.

A partir des manipulations décrites en phase 2, réaliser une pose de buton avec :

- Niveau : z_a = +9 m
- Raideur : K = 76 984 kN/m/m
- Précontrainte : P = 0 kN/m
- Inclinaison : α= 0°
- « Travail en compression » uniquement.

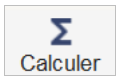
Ensuite, modéliser une excavation avec pose de blindage jusqu'à la cote z = +5,0 m.



Enregistrer votre projet.

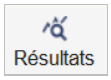
D.1.3 Etape 3 : Calculs et résultats

Pour lancer les calculs à la fin de la saisie de l'ensemble des paramètres du projet, cliquer sur le bouton « Calculer » depuis la barre de boutons :



Remarque : les calculs peuvent être lancés à n'importe quel moment dès que les caractéristiques du projet, du sol et de la paroi sont enregistrées.

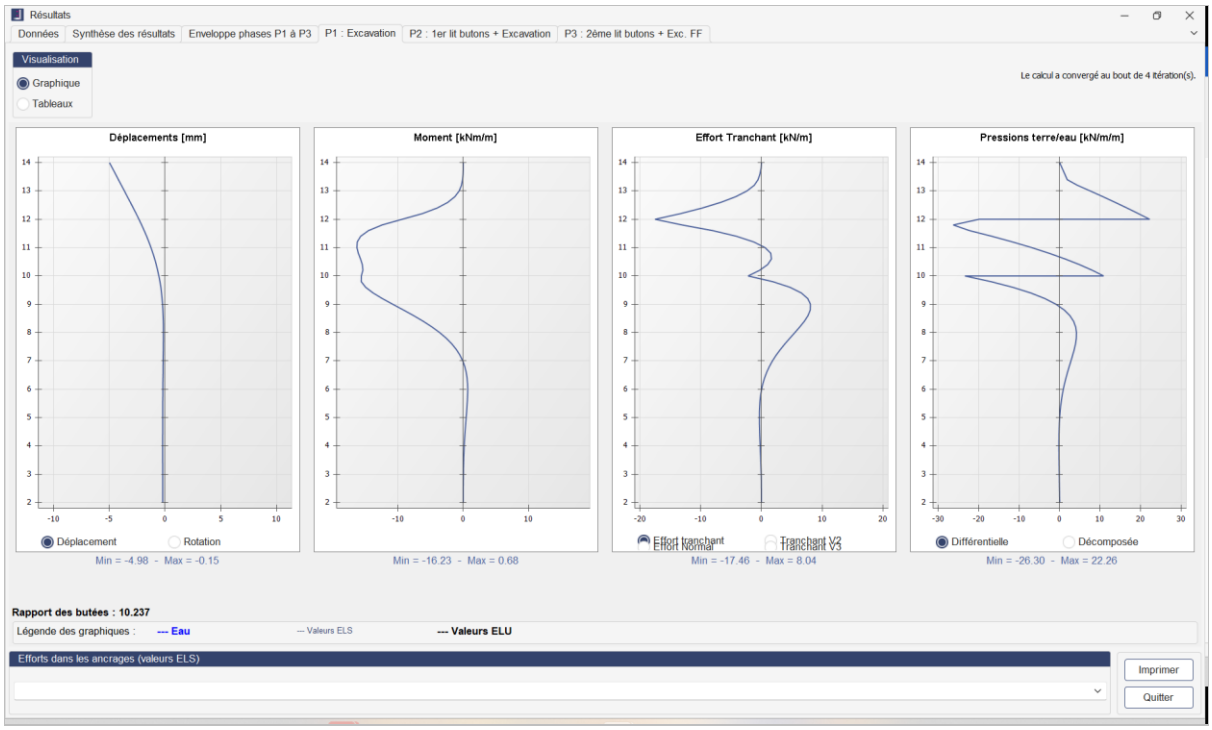
Les courbes des déplacements, des efforts tranchants et des moments fléchissants apparaissent sur l'onglet de la phase en cours. Il est possible de visualiser les résultats des différentes phases en passant d'un onglet à l'autre.
Pour consulter l'ensemble des résultats proposés dans K-Réa de façon plus détaillée, cliquer sur le bouton :



Afficher ensuite la « **Phase 1** ».

Les résultats de la phase 1 s'affichent sous forme graphique.

Nous y retrouvons les déplacements, les moments, les efforts tranchants, ainsi que les pressions des terres et de l'eau (affichage en pressions "différentielles" ou "décomposées"). Sous chaque graphique sont affichées les valeurs minimales et maximales obtenues.

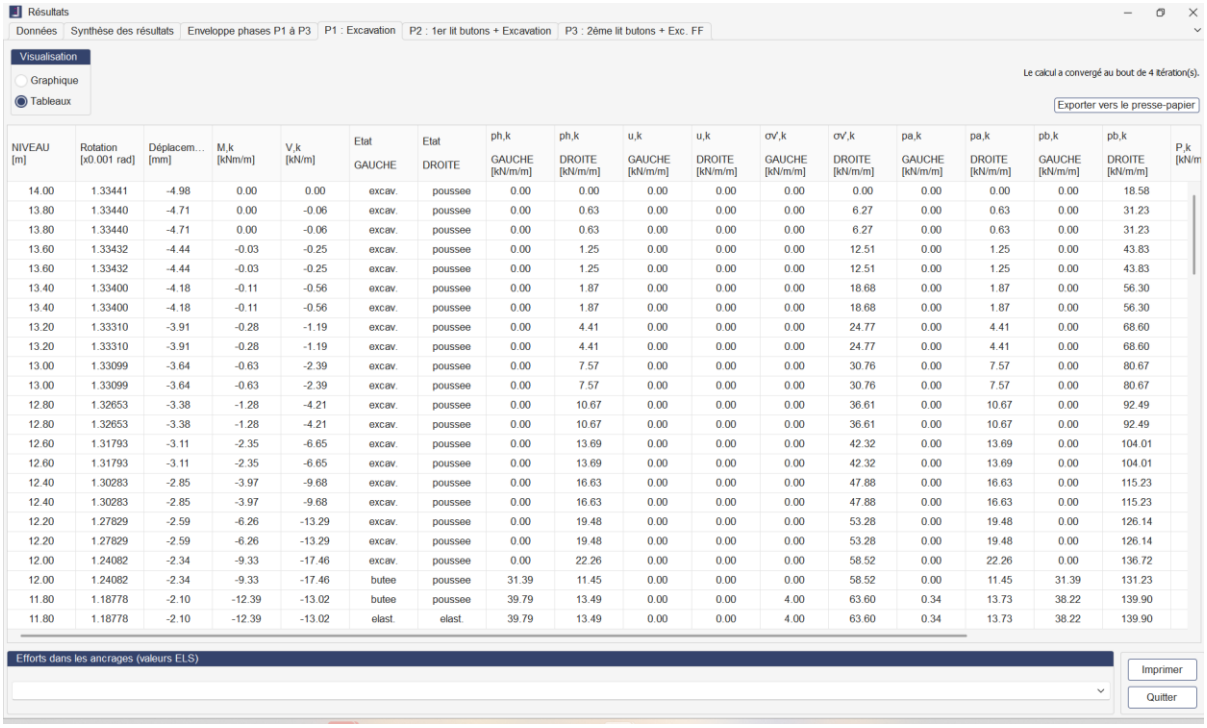


L'allure des courbes correspond bien au comportement d'un écran auto-stable.

Le déplacement maximal obtenu en phase 1 est inférieur à 1 cm. Le moment maximal obtenu est 16 kNm/m. L'effort tranchant maximal obtenu est 17,5 kN/m.

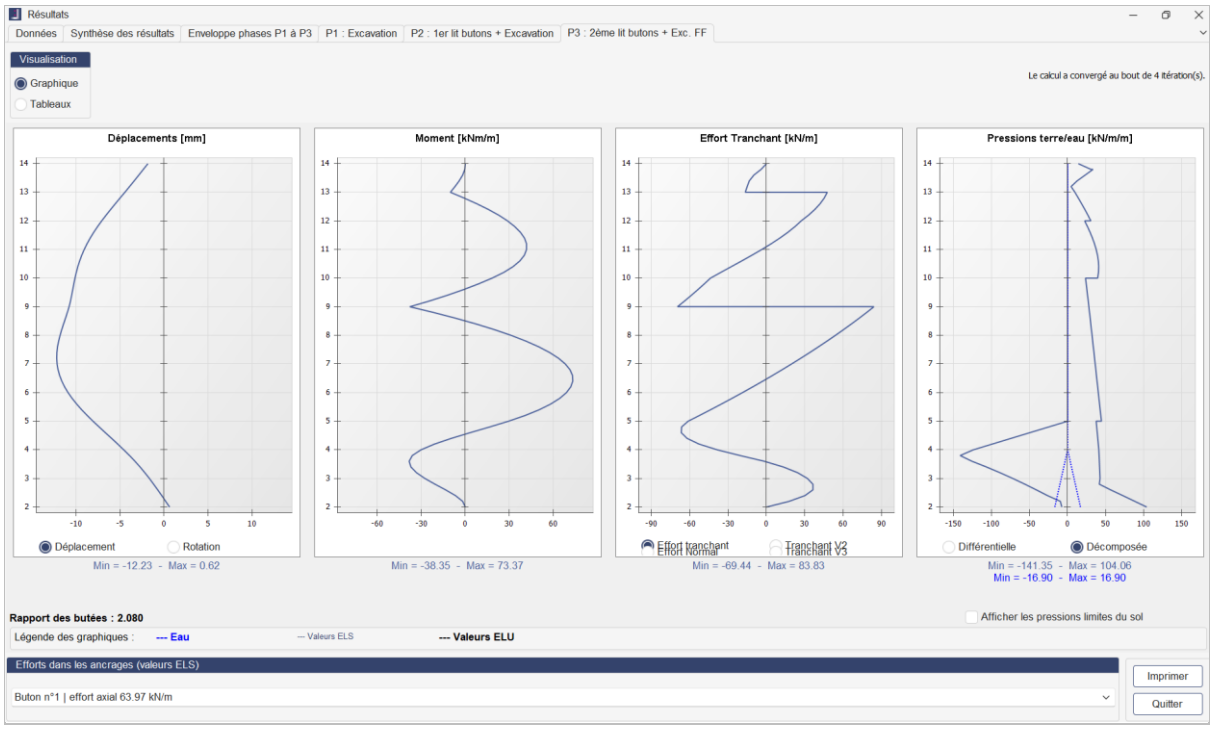
Le dernier graphique à droite permet de visualiser soit la pression différentielle (résultante des pressions des terres et d'eau), soit les différents termes de pression des terres et d'eau de chaque côté de l'écran. La copie d'écran ci-dessus illustre l'option "différentielle".

Il est également possible de basculer sur un affichage des résultats sous forme de tableau (en haut à gauche de la fenêtre).



NIVEAU [m]	Rotation [x0.001 rad]	Déplacem... [mm]	M,k [kNm/m]	V,k [kN/m]	Etat GAUCHE	Etat DROITE	ph,k GAUCHE [kN/m/m]	ph,k DROITE [kN/m/m]	u,k GAUCHE [kN/m/m]	u,k DROITE [kN/m/m]	σv',k GAUCHE [kN/m/m]	σv',k DROITE [kN/m/m]	pa,k GAUCHE [kN/m/m]	pa,k DROITE [kN/m/m]	pb,k GAUCHE [kN/m/m]	pb,k DROITE [kN/m/m]	P,k [kN/m
14.00	1.33441	-4.98	0.00	0.00	excav.	poussee	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.58	
13.80	1.33440	-4.71	0.00	-0.06	excav.	poussee	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	6.27	0.00	0.63	0.00	31.23	
13.80	1.33440	-4.71	0.00	-0.06	excav.	poussee	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	6.27	0.00	0.63	0.00	31.23	
13.60	1.33432	-4.44	-0.03	-0.25	excav.	poussee	0.00	1.25	0.00	0.00	0.00	12.51	0.00	1.25	0.00	43.83	
13.60	1.33432	-4.44	-0.03	-0.25	excav.	poussee	0.00	1.25	0.00	0.00	0.00	12.51	0.00	1.25	0.00	43.83	
13.40	1.33400	-4.18	-0.11	-0.56	excav.	poussee	0.00	1.87	0.00	0.00	0.00	18.68	0.00	1.87	0.00	56.30	
13.40	1.33400	-4.18	-0.11	-0.56	excav.	poussee	0.00	1.87	0.00	0.00	0.00	18.68	0.00	1.87	0.00	56.30	
13.20	1.33310	-3.91	-0.28	-1.19	excav.	poussee	0.00	4.41	0.00	0.00	0.00	24.77	0.00	4.41	0.00	68.60	
13.20	1.33310	-3.91	-0.28	-1.19	excav.	poussee	0.00	4.41	0.00	0.00	0.00	24.77	0.00	4.41	0.00	68.60	
13.00	1.33099	-3.64	-0.63	-2.39	excav.	poussee	0.00	7.57	0.00	0.00	0.00	30.76	0.00	7.57	0.00	80.67	
13.00	1.33099	-3.64	-0.63	-2.39	excav.	poussee	0.00	7.57	0.00	0.00	0.00	30.76	0.00	7.57	0.00	80.67	
12.80	1.32653	-3.38	-1.28	-4.21	excav.	poussee	0.00	10.67	0.00	0.00	0.00	36.61	0.00	10.67	0.00	92.49	
12.80	1.32653	-3.38	-1.28	-4.21	excav.	poussee	0.00	10.67	0.00	0.00	0.00	36.61	0.00	10.67	0.00	92.49	
12.60	1.31793	-3.11	-2.35	-6.65	excav.	poussee	0.00	13.69	0.00	0.00	0.00	42.32	0.00	13.69	0.00	104.01	
12.60	1.31793	-3.11	-2.35	-6.65	excav.	poussee	0.00	13.69	0.00	0.00	0.00	42.32	0.00	13.69	0.00	104.01	
12.40	1.30283	-2.85	-3.97	-9.68	excav.	poussee	0.00	16.63	0.00	0.00	0.00	47.88	0.00	16.63	0.00	115.23	
12.40	1.30283	-2.85	-3.97	-9.68	excav.	poussee	0.00	16.63	0.00	0.00	0.00	47.88	0.00	16.63	0.00	115.23	
12.20	1.27829	-2.59	-6.26	-13.29	excav.	poussee	0.00	19.48	0.00	0.00	0.00	53.28	0.00	19.48	0.00	126.14	
12.20	1.27829	-2.59	-6.26	-13.29	excav.	poussee	0.00	19.48	0.00	0.00	0.00	53.28	0.00	19.48	0.00	126.14	
12.00	1.24082	-2.34	-9.33	-17.46	excav.	poussee	0.00	22.26	0.00	0.00	0.00	58.52	0.00	22.26	0.00	136.72	
12.00	1.24082	-2.34	-9.33	-17.46	butee	poussee	31.39	11.45	0.00	0.00	0.00	58.52	0.00	11.45	31.39	131.23	
11.80	1.18778	-2.10	-12.39	-13.02	butee	poussee	39.79	13.49	0.00	0.00	4.00	63.60	0.34	13.73	38.22	139.90	
11.80	1.18778	-2.10	-12.39	-13.02	elast.	elast.	39.79	13.49	0.00	0.00	4.00	63.60	0.34	13.73	38.22	139.90	

Afficher ensuite la "**Phase 3**" pour visualiser les résultats de la dernière phase.



Le déplacement maximal obtenu en phase 3 est de l'ordre d'1 cm.

Le moment maximal obtenu est de 73 kNm/m, soit 73 kNm/m x 2,2 m = 160,6 kNm par profilé, ce qui correspond à une contrainte de 67 MPa.

<u>Efforts repris par les butons</u>

Les efforts <u>axiaux</u> maximaux repris par les butons atteignent 75 kN/m pour le lit supérieur en phase 2 et 153 kN/m pour le lit inférieur en phase 3 : nous les retrouvons tous les deux sur la courbe d'efforts tranchants (sauts aux niveaux +173,0 m et +169,0 m).

L'effort axial maximal du lit supérieur est obtenu en phase 2, de l'ordre de 75 kN/m, soit un effort par buton de 75 kN/m x 4,4 m = 330 kN/buton.

L'effort axial maximal du lit inférieur est obtenu en phase 3, de l'ordre de 153 kN/m, soit un effort par buton de 153 kN/m x 4,4 m ≈ 673 kN/buton.

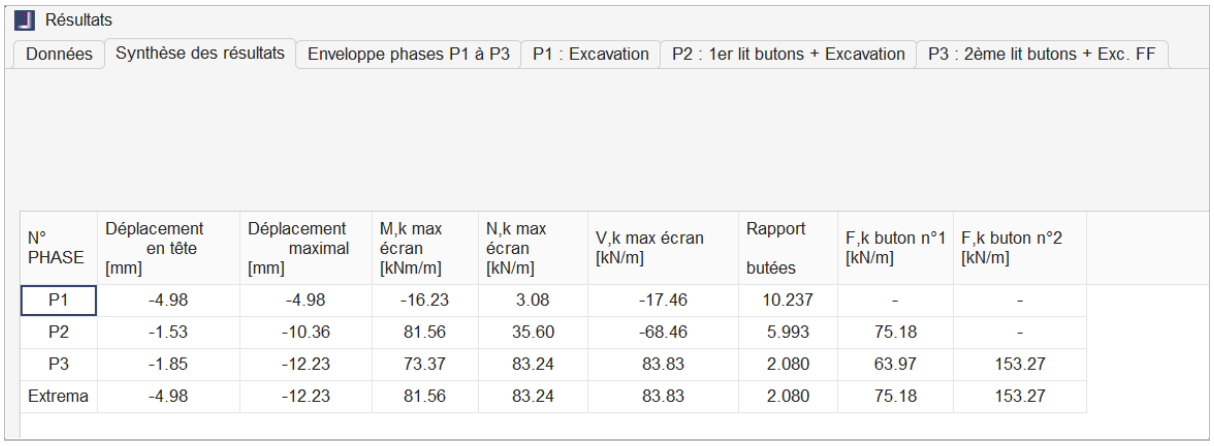
Ces efforts sont admissibles vis-à-vis de la résistance en compression et flambement.

Rapport de butée

Le rapport de butées reste supérieur à 2, ce qui est usuellement acceptable pour ce type d'ouvrage.

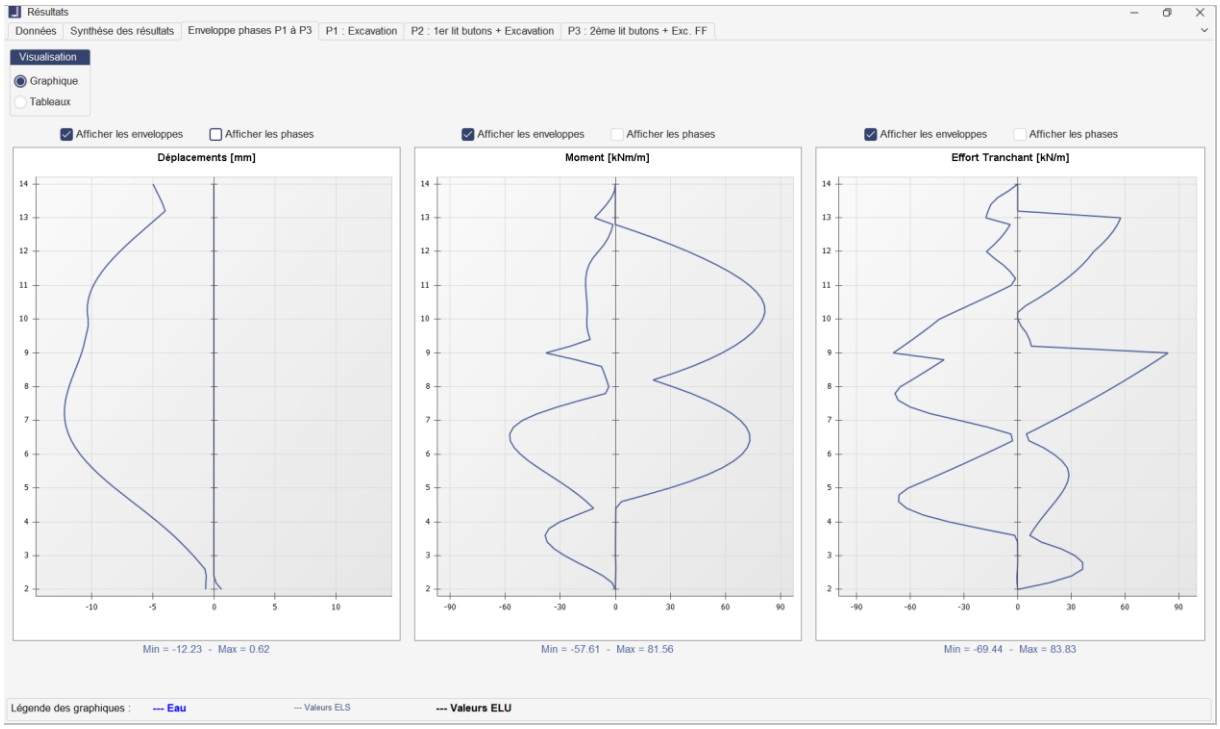
2 onglets supplémentaires permettent ensuite d'accéder à des résultats synthétiques :

- **La synthèse des résultats** : cet écran reprend sous forme de tableaux les principaux résultats obtenus pour chaque phase et les valeurs extrêmes obtenues pour l'ensemble du phasage. Ce tableau permet d'avoir un aperçu rapide des valeurs maximales de déplacements, des moments, des efforts dans les ancrages, etc… mais également de visualiser facilement dans quelle(s) phase(s) sont atteints les différents extrema.



N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées	F,k buton n°1 [kN/m]	F,k buton n°2 [kN/m]
P1	-4.98	-4.98	-16.23	3.08	-17.46	10.237	-	-
P2	-1.53	-10.36	81.56	35.60	-68.46	5.993	75.18	-
P3	-1.85	-12.23	73.37	83.24	83.83	2.080	63.97	153.27
Extrema	-4.98	-12.23	81.56	83.24	83.83	2.080	75.18	153.27

- **Les enveloppes** : cet écran (avec affichage soit sous forme graphique, soit sous forme d'un tableau) présente les courbes enveloppes des déplacements, des moments et des efforts tranchants. Dans notre exemple, nous n'avons pas effectué de demande particulière, et les courbes enveloppes présentées ont donc été calculées pour l'ensemble du phasage (phases 1 à 3).

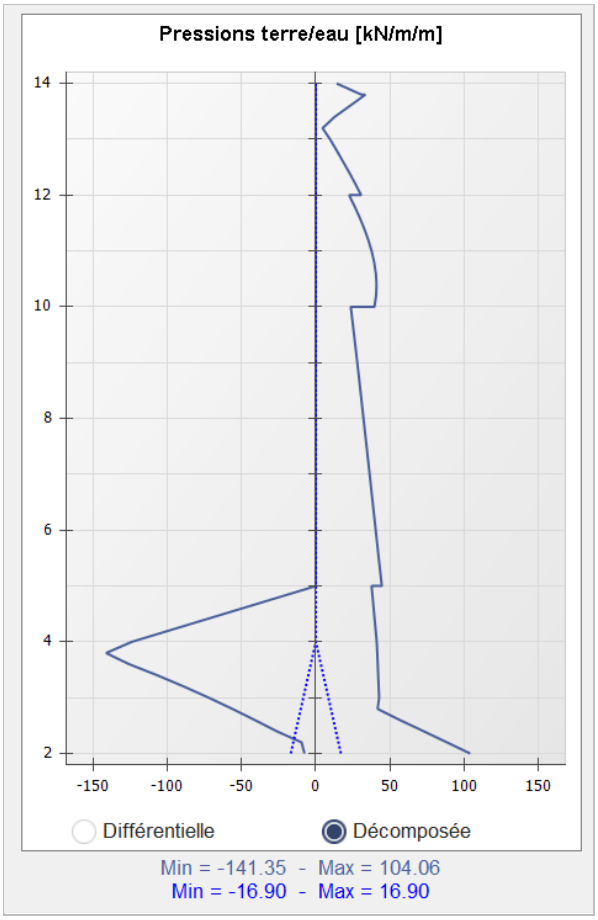


D.1.4 Annexe : Traitement de p_{max}

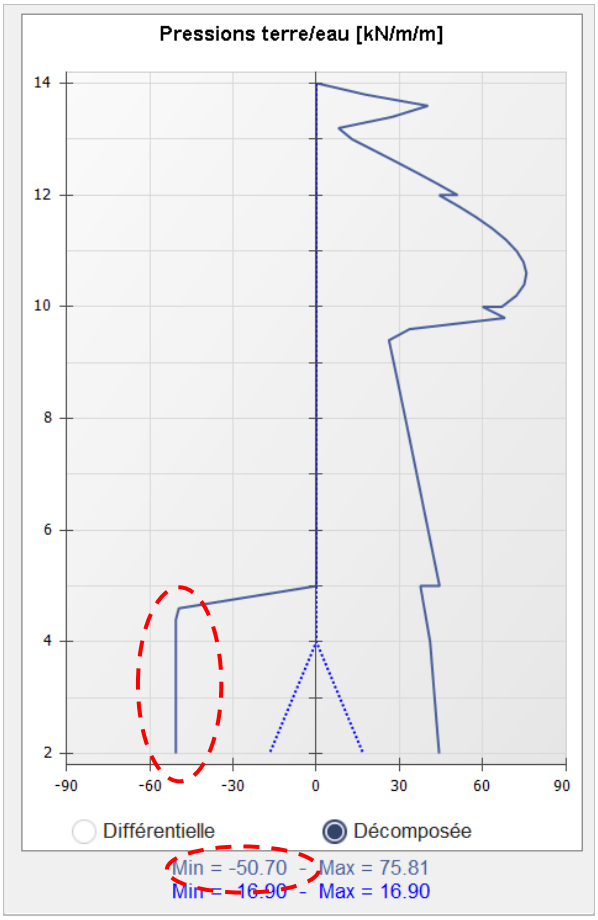
Dans le cas d'un écran discontinu, la butée limite est bornée à p_{max} par élément, soit à R x p_{max} pour un écran continu équivalent.

p_{max} correspond à la pression limite du sol (cas ELU) ou à la pression de fluage (cas ELS).
Nous allons diminuer volontairement la valeur de p_{max} de la couche de Sables (où se développe la butée) afin d'illustrer la prise en compte du plafonnement à R x p_{max} de la butée.

Nous définissons donc une valeur de p_{max} = 60 kPa pour la couche de Sables dans la fenêtre de **Définition de couches de sol** accessible dans le menu **Données**. Cette modification s'effectue dans la fenêtre **Définition des couches de sol**, depuis le menu Données.



Profils de pressions avant diminution de p_{max}



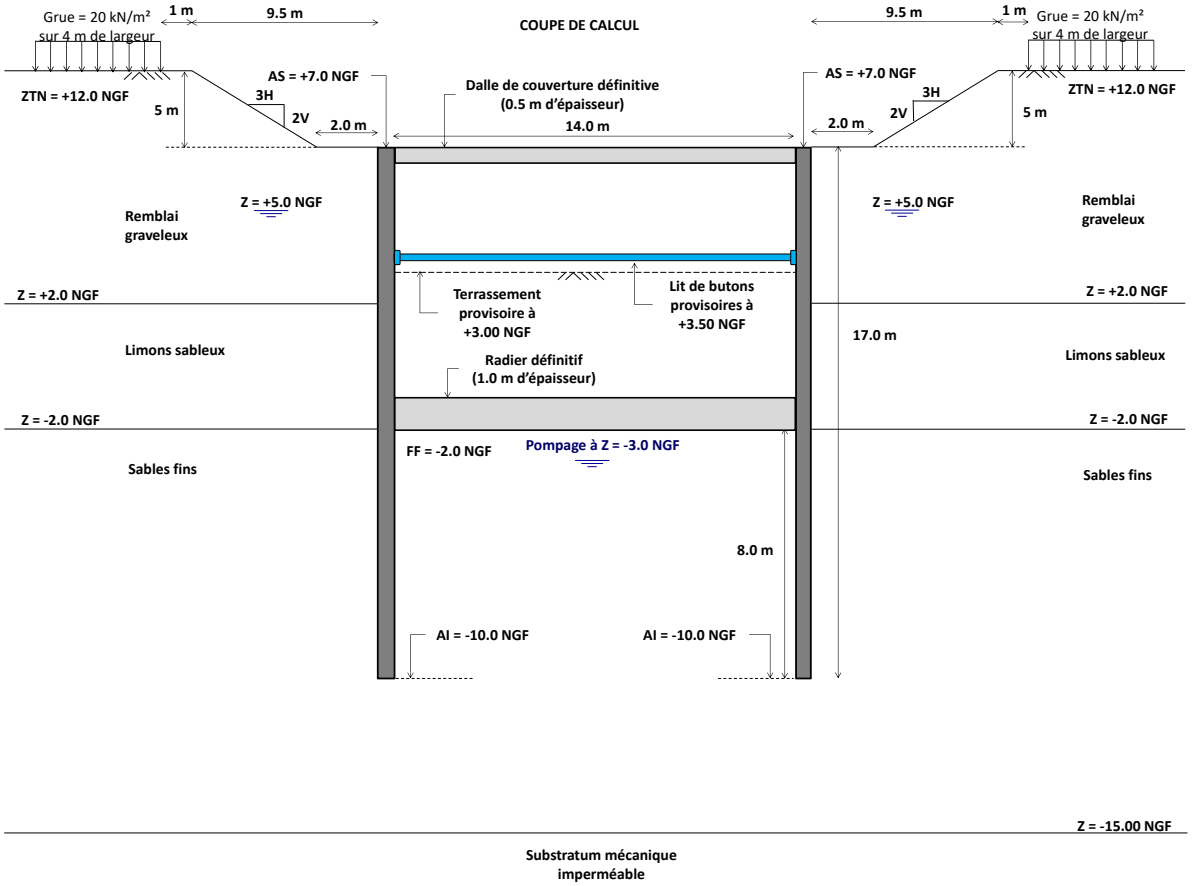
Profils de pressions après diminution de p_{max}

Nous observons que la butée mobilisée a été bien plafonnée à :

$$R \times p_{max} = 0{,}845 \times 60 \text{ kN/m}^2 = 50{,}7 \text{ kN/m/m}$$

D.2. Tutoriel 2 : Fouille butonnée avec rabattement de nappe

L'exemple étudié est celui d'une fouille butonnée constituée de deux parois moulées parallèles liaisonnées par 1 lit de butons provisoires en phase transitoire et 2 dalles béton en phase définitive.



Le niveau du TN se trouve initialement à +12,0 NGF.

Nous allons procéder en plusieurs étapes afin d'apprécier l'effet du gradient hydraulique ainsi que celui de la symétrie / asymétrie du modèle.

- **Etape 1** : Cas d'une coupe parfaitement symétrique sans gradient ;
- **Etape 2** : Prise en compte du gradient lié au rabattement de nappe ;
- **Etape 3** : Passage à un calcul double écran ;
- **Etape 4** : Coupe asymétrique.

Les parois moulées ont une épaisseur de 82 cm et sont bétonnées sur une hauteur totale de 17 m. L'arase supérieure (AS) des parois est prévue à +7,0 NGF, celle inférieure (AI) à -10,0 NGF.

Le phasage des travaux prévoit une phase d'excavation initiale pour décaisser le terrain avant forage et bétonnage de la paroi moulée. Ceci implique l'aménagement de talus 3H/2V de 5 m de hauteur dont le pied est situé à 2 m de la tête des parois.

La cinématique de phasage consiste en **7 étapes** successives avec la mise en place des appuis provisoires et définitifs :

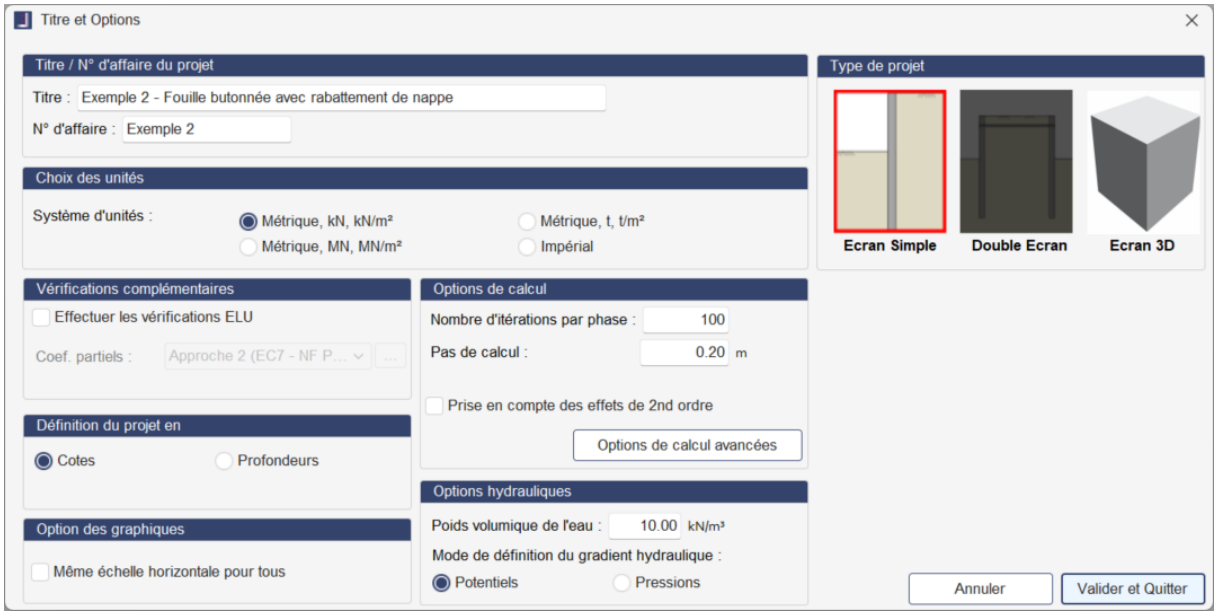
- 1 lit de butons provisoires
- 2 niveaux d'appuis définitifs :
  - **Dalle de couverture** : 0,50 m d'épaisseur
  - **Radier** : 1,0 m d'épaisseur

Le niveau de la nappe phréatique se trouve à +5,0 NGF avant démarrage des travaux. Ensuite, la nappe sera systématiquement rabattue 1 mètre sous le niveau du fond de fouille.

Le béton utilisé sera de type C25/30. Le module du béton est pris égal à **20 GPa** en phases transitoires et **10 GPa** à long terme.

D.2.1 Etape 1 : Coupe symétrique sans gradient

D.2.1.1. Définition du projet : Titre et options



Paramètres spécifiques à définir :

- Dans le cadre **Type de projet** (à droite), sélectionner « Ecran simple ».
- Dans le cadre **Choix des unités** choisir le système d'unités de votre projet, en cochant « Métrique, kN, kN/m^2 ».
- **Définition du projet en** « Cotes », ce qui permet d'orienter l'axe vertical vers **le haut**.
- **Vérifications complémentaires** : décocher la case « Effectuer les vérifications ELU ».
- Dans le cadre **Options de calcul**, conserver les réglages par défaut : 100 itérations par phase de calcul et un pas de calcul de 0,2 m pour l'écran.
    - **Options de calcul avancées** : Choisir la méthode de calcul des talus / risberme à partir du « Modèle Norme ».
- Dans le cadre **Options hydrauliques** laisser le poids volumique de l'eau égale à 10,00 kN/m³. Choisir « Pressions » comme mode de définition du gradient hydraulique (ceci n'interviendra pas dans les calculs puisque le projet est hors nappe).
- Cliquer sur le bouton **Valider et quitter**.

D.2.1.2. Définition des couches de sol

Les caractéristiques générales des trois couches intéressant l'exercice sont récapitulées dans le tableau suivant.

Couche	γ (kN/m^3)	γ' (kN/m^3)	φ (°)	c (kPa)	dc (kN/m²/m)	δ_a/φ (-)	δ_p/φ (-)	k_h (kN/m²/m)
Remblai graveleux	18	9	33	0	0	0,667	-0,667	10 000
Limons sableux	20	10	30	5	0	0,667	-0,667	8 000
Sables fins	20	10	33	1	0	0,667	-0,667	25 000

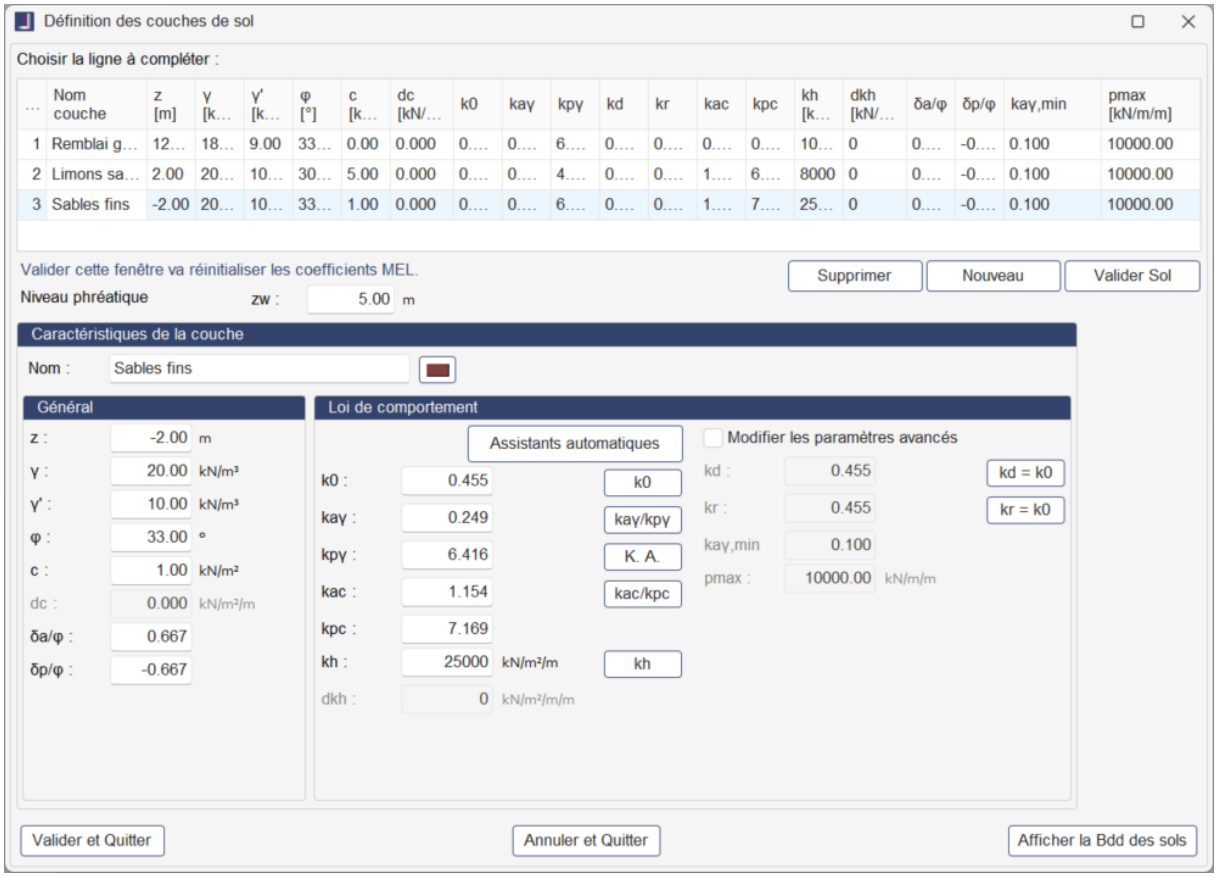
Utiliser ensuite les assistants de K-Réa pour calculer les paramètres permettant de constituer la loi de comportement de chaque couche.

Les paramètres à obtenir à l'aide des assistants sont les suivants.

Couche	k_0 (-)	$k_{a\gamma}$ (-)	$k_{p\gamma}$ (-)	k_{ac} (-)	k_{pc} (-)
Remblai graveleux	0,455	0,249	6,416	0	0
Limons sableux	0,500	0,282	4,980	1,238	6,293
Sables fins	0,455	0,249	6,416	1,154	7,169

Les autres paramètres sont conservés à leurs valeurs par défaut. Laisser pour cela la case **Modifier les paramètres avancés** décochée.

L'écran obtenu est alors le suivant :



Cliquer sur **Valider et quitter**.

D.2.1.3. Définition de l'écran

Le tableau ci-dessous précise les caractéristiques de l'écran.

Section	z0 Niv. Sup (NGF)	z,base Niv. Inf (NGF)	E Module Young (kN/m²)	e Epaisseur (m)	EI (kNm²/m)	W (kN/m²)
1	+7,0	-10,0	$2 \times 10^{+7}$	0,82	918 947	20,5

L'écran suivant illustre les manipulations à opérer dans K-Réa.

Enfin, cliquer sur **Valider et quitter** pour prendre en compte les valeurs saisies et les voir apparaître avec la représentation graphique des données initiales du projet.

D.2.1.4. Définition du phasage

Il convient à présent de définir les actions à considérer dans chaque phase de calcul :

PHASE		ACTIONS
PHASES TRANSITOIRES	Initiale	• Terrassement initial à gauche de la paroi en forme de talus. • Terrassement initial à droite de la paroi à +7,0 NGF.
	1	• Terrassement côté droit à +3,0 NGF. • Rabattement de la nappe côté droit à +2,5 NGF. • Surcharge de Boussinesq de 20 kN/m/m à 10,5 mètres à l'arrière de l'écran sur une largeur de 4 mètres.
	2	• Mise en place d'un lit horizontal de butons à +3,5 NGF sans précharge (K = 50 000 kN/m/m) • Terrassement côté droit jusqu'au fond de fouille à -2,0 NGF. • Rabattement de la nappe côté droit à -3,0 NGF.
	3	• Coulage du béton du radier : on considère uniquement son poids propre mais pas encore sa raideur. • Pompage à -3,0 NGF opérationnel jusqu'à la fin des travaux (sécuritaire).
	4	• Activation de la raideur du radier (ks = 2 860 000 kN/m²/m). • Pompage à -3,0 NGF toujours opérationnel.
	5	• Construction de la dalle de couverture • (ks = 2 860 000 kN/m²/m) • Dépose du lit de butons. • Pompage à -3,0 NGF toujours opérationnel.
PHASES SERVICE	6	• Mise en service de l'ouvrage + Arrêt du pompage
	7	• Fluage du béton de la paroi moulée et des dalles

<u>Commentaire</u> :

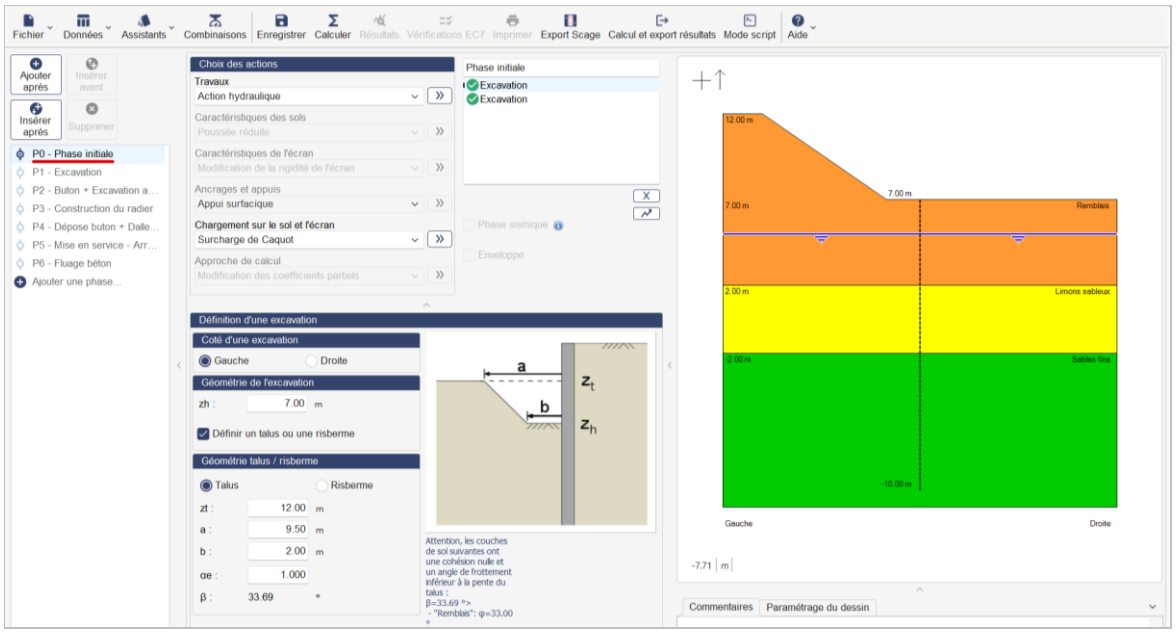
De manière générale, l'effet d'un gradient hydraulique (ou d'une surpression interstitielle) doit être pris en compte en situations transitoires, sauf si son effet est favorable.

Dans notre cas, l'arrêt du pompage a un effet favorable vis-à-vis du dimensionnement de la paroi moulée. Le régime permanent ne sera pas acquis tout de suite après le coulage du radier (arrêt effectif du pompage), c'est pour cela qu'on continue à simuler la présence du gradient jusqu'à la fin de travaux (approche conservatrice).

D.2.1.4.1. *Phase initiale*

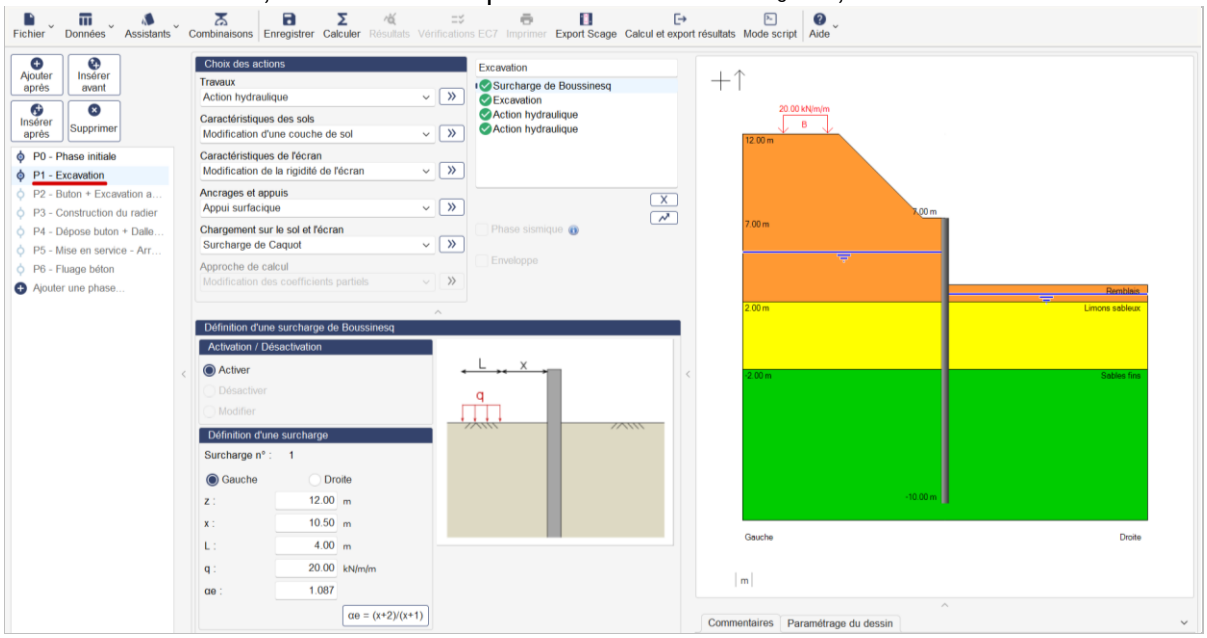
Le terrain initial est supposé horizontal à droite de l'écran. Mais un talus est à définir à gauche de l'écran.

- Action « Excavation » à gauche de type « Talus » :
  - z_h = +7,0 NGF z_t = +12,0 NGF
  - a = 9,5 m b = 2,0 m α_e = 1,0
- Action « Excavation » à droite : z_h =+7,0 NGF



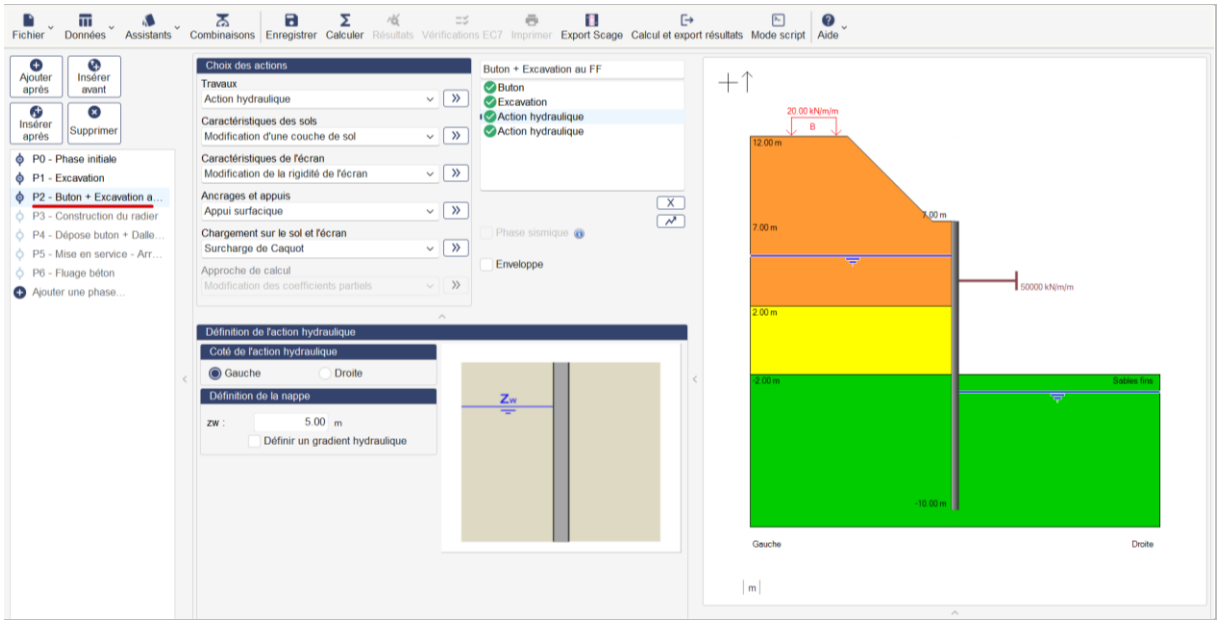
D.2.1.4.2. *Phase 1 : Excavation*

- Action « Excavation » à droite : z_h = +3,0 NGF
- « Action hydraulique » à droite : z_w = +2,5 NGF
- Action « Surcharge de Boussinesq » à gauche (surcharge de la grue) :
  - z = +12,0 NGF x = 10,50 m
  - L = 4,0 m q = 20 kN/m/m α_e = 1,087



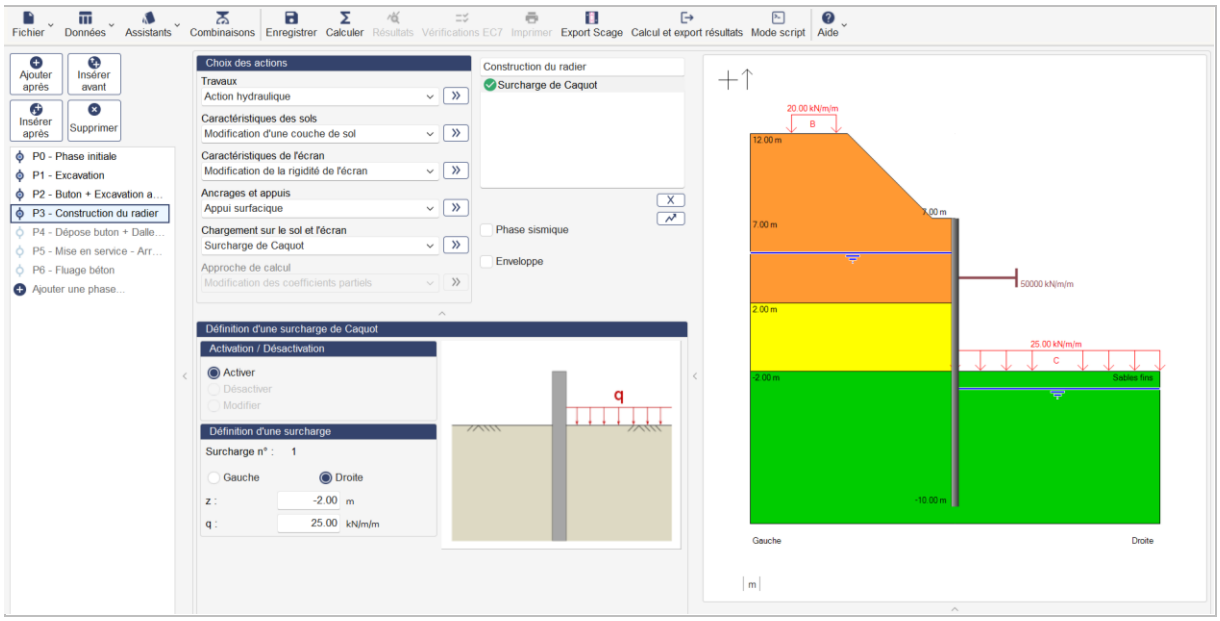
D.2.1.4.3. *Phase 2 : Mise en place du lit de butons + Excavation au FF*

- Action « Buton » à droite avec :
  - z_a = +3,50 NGF K = 50 000 kN/m/m
  - P = 0 kN/m α = 0°
- « Action « Excavation » à droite : z_h = -2,0 NGF
- « Action hydraulique » à droite : z_w = -3,0 NGF
- « Action hydraulique » à gauche : z_w = -5,0 NGF



D.2.1.4.4. *Phase 3 : Coulage du radier*

- Action « Surcharge de Caquot » à droite :
  - z = -2,0 NGF q = 25 kN/m/m

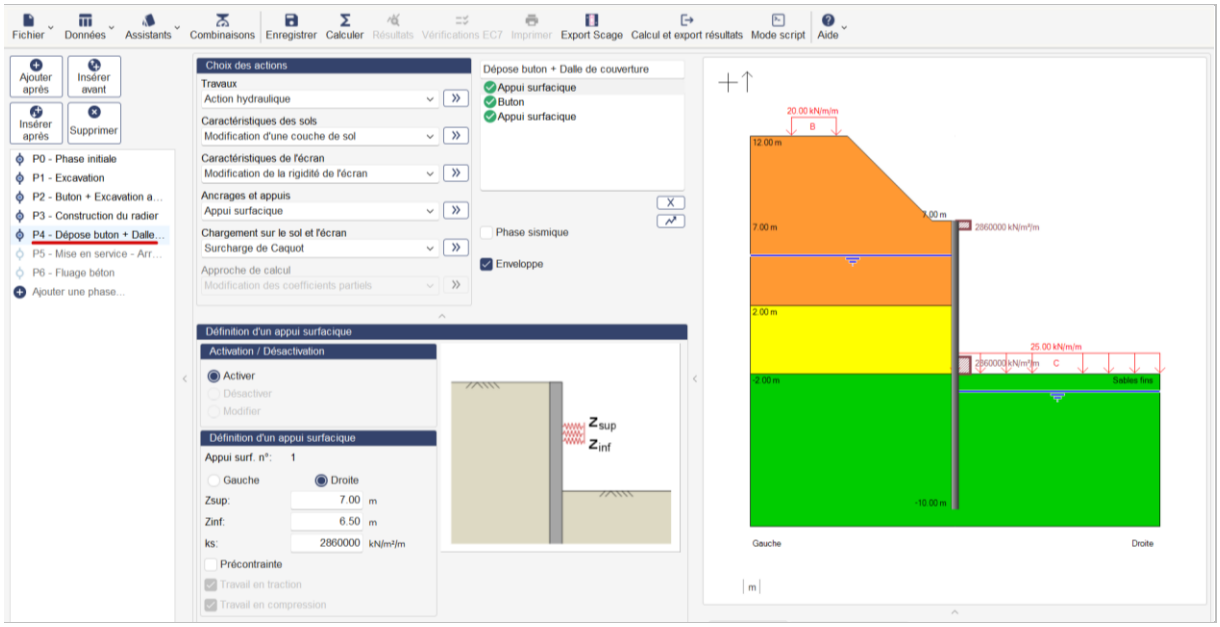


D.2.1.4.5. *Phase 4 : Dépose buton et Dalle de couverture*

Action « Appui surfacique » (dalle de couverture) à droite :

- z_{sup} = +7,0 NGF z_{inf} = +6,50 NGF
- ks = 2 860 000 kN/m²/m Précontrainte : décochée

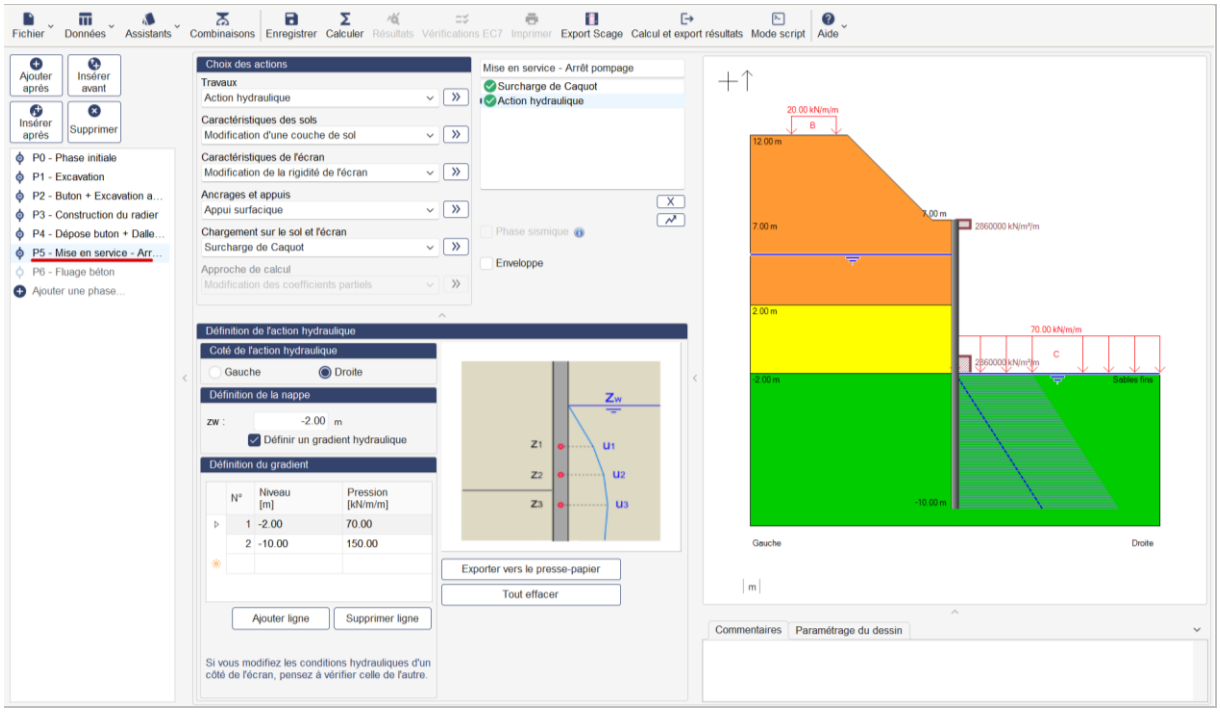
- Action « Buton » : désactiver le lit de butons
- Action « Appui surfacique » (radier) à droite :
  - z_{sup} = -1,0 NGF z_{inf} = -2,0 NGF
  - ks = 2 860 000 kN/m²/m Précontrainte : décochée



D.2.1.4.6. *Phase 5 : Mise en service - Arrêt pompage*

- Action « Surcharge de Caquot » :
  - Modifier surcharge n°1 (Phase 3) q = 70 kN/m/m
- « Action hydraulique » à droite avec un gradient hydraulique :
  - z_w = -2,0 NGF
  - Cocher « Définir un gradient hydraulique »

Niveau (m)	Pression (kN/m/m)
-2	70,0
-10	150,0



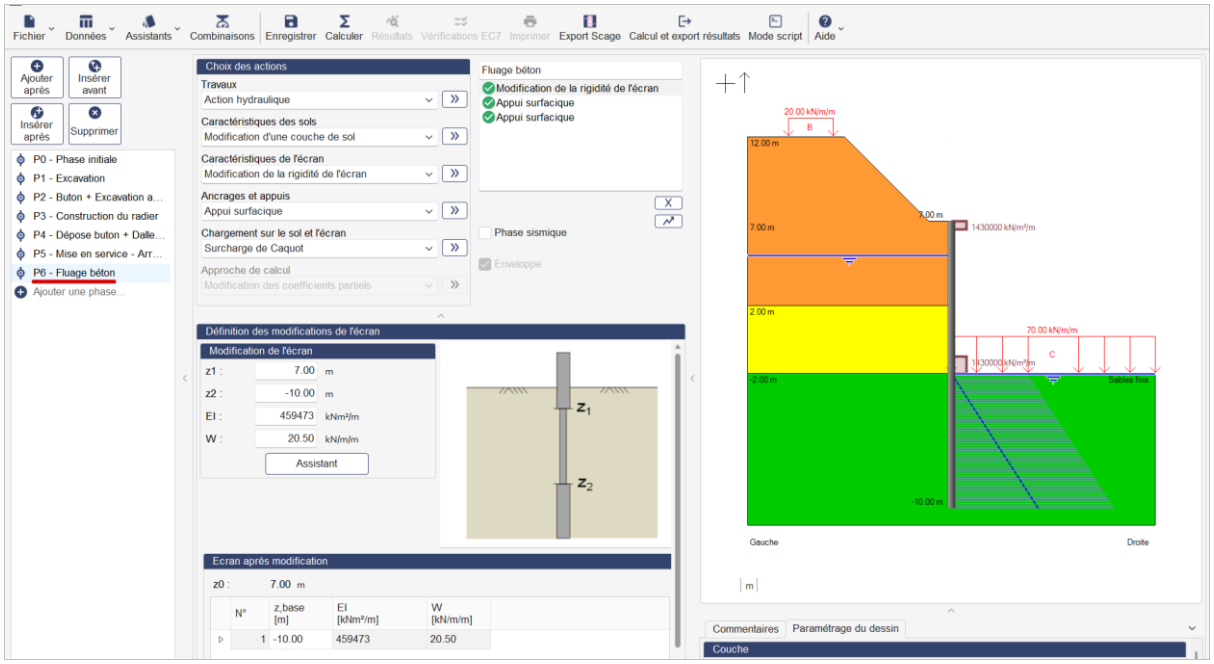
D.2.1.4.7. *Phase 6 : Fluage béton*

- Action « Modification de la rigidité de l'écran » :
  - z_1 = +7,0 m z_2 = -10,0 m
  - EI = 459 473 kNm²/m W = 20,5 kN/m/m

A partir de l'assistant :

  - Module de Young = 10 GPa = 1 x 10^{+7} kN/m²
  - Epaisseur = 0,82 m

- Action « Appui surfacique » :
  - Modifier appui surfacique n°1 ks = 1 430 000 kN/m²/m
- Action « Appui surfacique » :
  - Modifier appui surfacique n°2 ks = 1 430 000 kN/m²/m



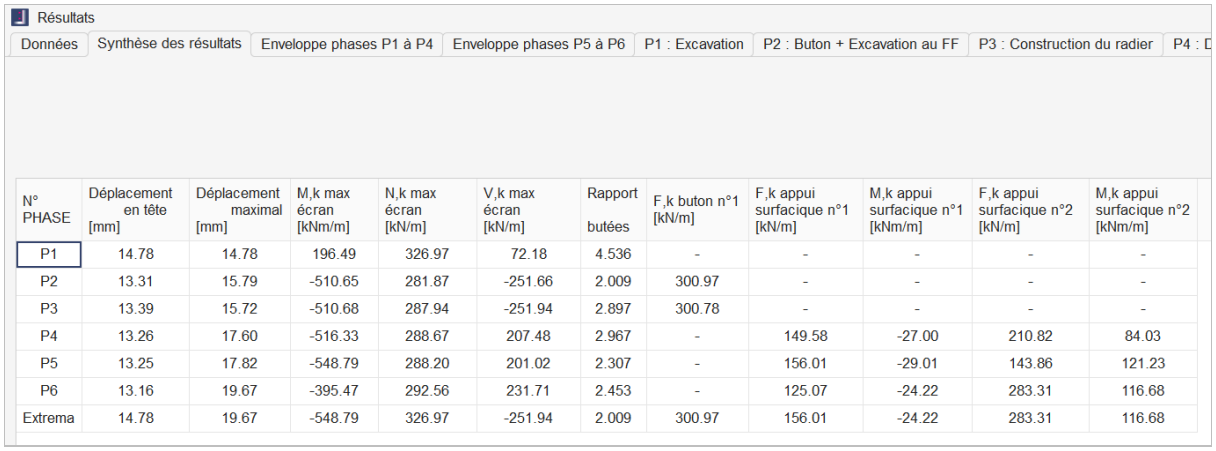
D.2.1.4.8. *Enveloppe*

<u>Activer le calcul de l'enveloppe des efforts</u> en cliquant sur la case à coche « **Enveloppe** » dans la **Phase 4**.

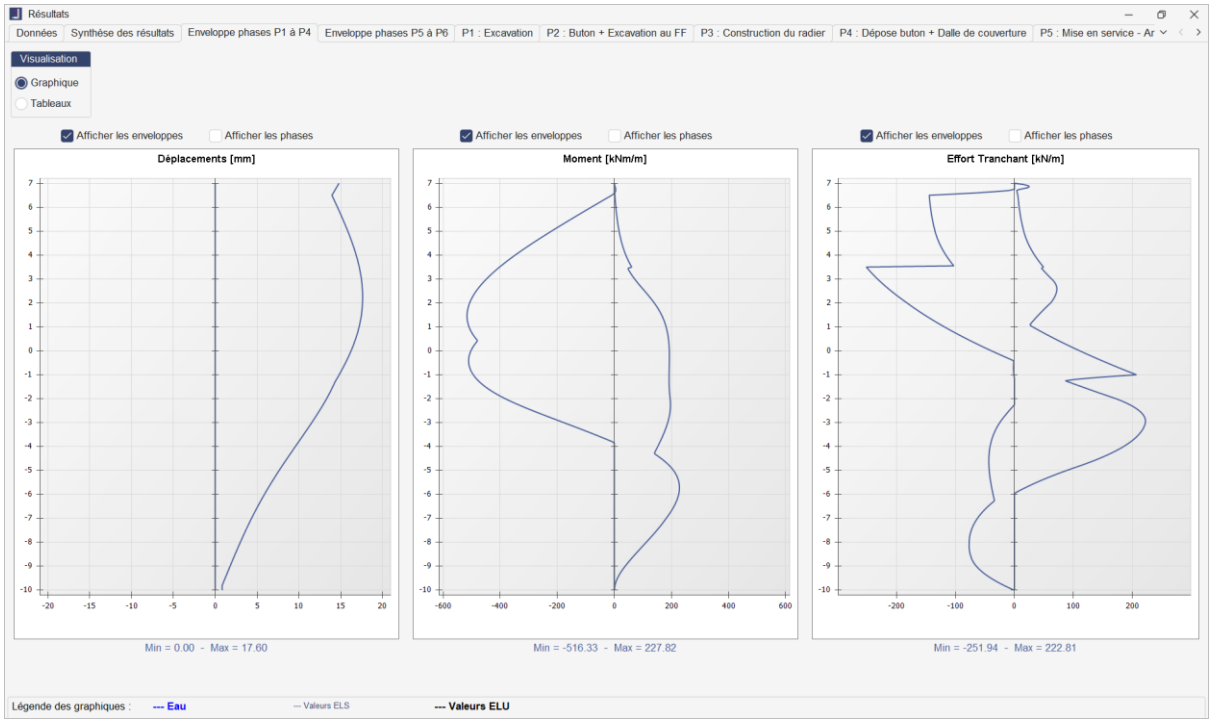
Enregistrer votre projet.

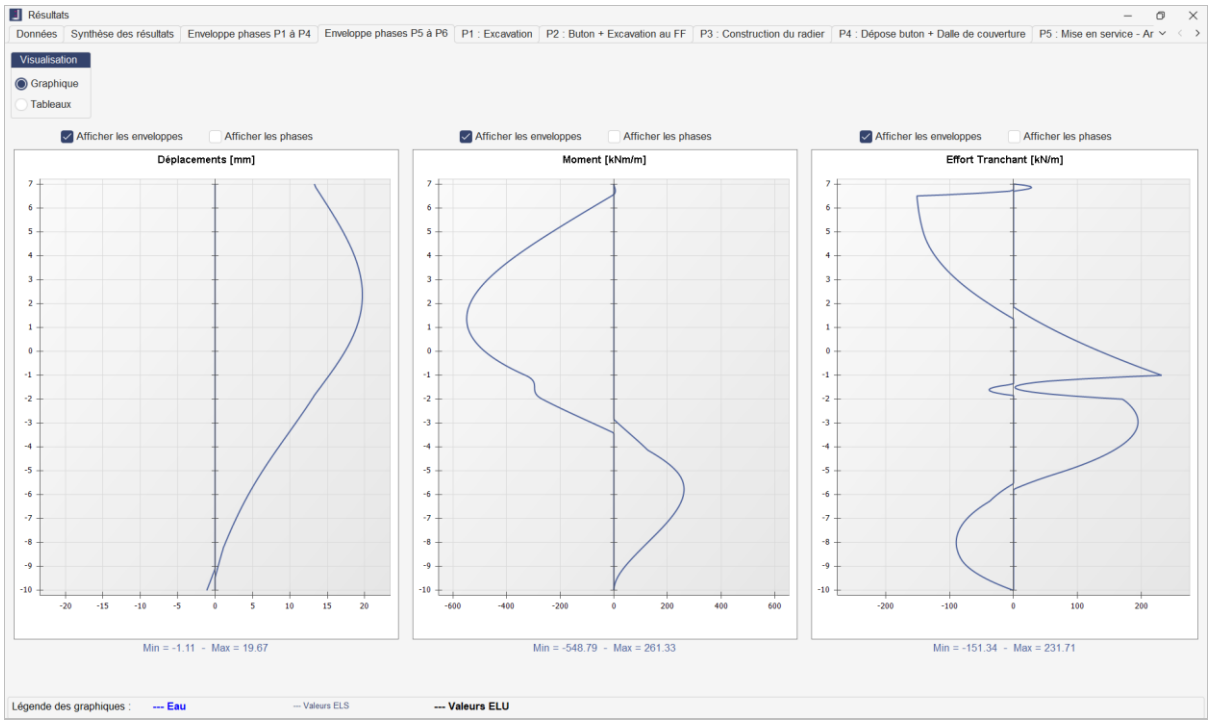
Calcul et résultats

Lancer le calcul en cliquant sur le bouton **Calculer**.
Les résultats sont désormais disponibles et accessibles à partir du bouton **Résultats**.



N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées	F,k buton n°1 [kN/m]	F,k appui surfacique n°1 [kN/m]	M,k appui surfacique n°1 [kNm/m]	F,k appui surfacique n°2 [kN/m]	M,k appui surfacique n°2 [kNm/m]
P1	14.78	14.78	196.49	326.97	72.18	4.536	-	-	-	-	-
P2	13.31	15.79	-510.65	281.87	-251.66	2.009	300.97	-	-	-	-
P3	13.39	15.72	-510.68	287.94	-251.94	2.897	300.78	-	-	-	-
P4	13.26	17.60	-516.33	288.67	207.48	2.967	-	149.58	-27.00	210.82	84.03
P5	13.25	17.82	-548.79	288.20	201.02	2.307	-	156.01	-29.01	143.86	121.23
P6	13.16	19.67	-395.47	292.56	231.71	2.453	-	125.07	-24.22	283.31	116.68
Extrema	14.78	19.67	-548.79	326.97	-251.94	2.009	300.97	156.01	-24.22	283.31	116.68





Lors de cette 1ère étape, nous obtenons les résultats « enveloppe » suivants :

	Phases transitoires	**Phases définitives**
	Ph. 1 à 4	*Ph. 5 et 6*
Déplacement	1,7 cm	1,9 cm
Moment fléchissant	520 kNm/m	550 kNm/m
Effort tranchant	250 kN/m	230 kN/m
Rapport de butées	2,0	2,3

D.2.2 Etape 2 : Prise en compte du gradient

Dans cette 2ème étape, on modélise le gradient hydraulique engendré par le rabattement de la nappe phréatique à chaque phase de calcul.

Cliquer sur le menu « **Fichier** » et choisir « **Enregistrer sous…** ».

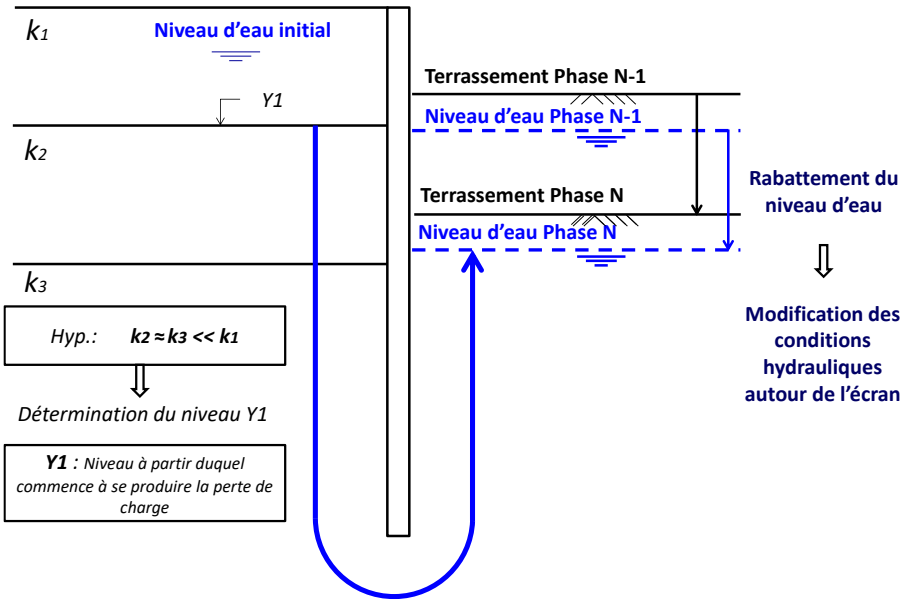
Nommer le fichier par exemple avec le nom suivant : « Exemple 2 – Etape 2 ».

D.2.2.1. A propos du gradient hydraulique

D.2.2.1.1. *Rappels théoriques*

Un rabattement de la nappe s'accompagne du développement d'un régime d'écoulement autour de la fiche de l'écran visant à rétablir la continuité de la charge hydraulique entre les deux côtés de l'écran. Le long d'une ligne de « courant », la charge hydraulique varie continuellement entre celle correspondant au niveau d'eau initial (côté terre) et celle correspondant au niveau imposé au fond de fouille.

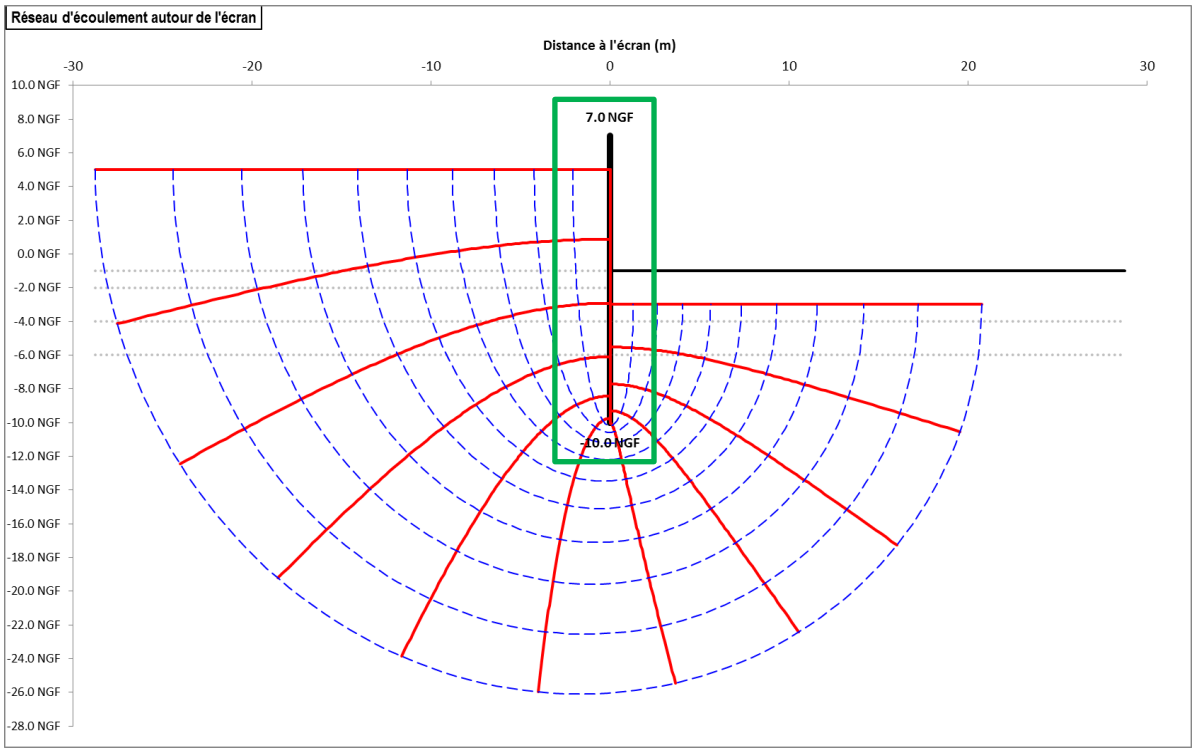
Dans le cas du présent exercice, on suppose que les sables fins et les limons ont des perméabilités (k_2 et k_3) comparables. La perméabilité du remblai graveleux (k_1) est supposée grande devant k_2 et k_3. Le remblai graveleux se comporte donc comme un horizon « ouvert ». Le régime d'écoulement se développe ainsi à partir de la base des remblais (+2,00 NGF) comme le montre la figure ci-dessous.



La figure ci-dessous illustre le champ d'écoulement se développant dans le terrain dans le cas d'un terrain homogène. Celui-ci est caractérisé par :

- Des **lignes équipotentielles** (courbes continues) : ensemble de points du massif avec le même potentiel.
- Les **lignes de courant** (courbes en pointillé) : trajectoires des particules d'eau soumises aux forces d'écoulement.

Dans le cas d'un calcul de l'écran basé sur le modèle des coefficients de réaction, le traitement du régime d'écoulement se limite à la prise en compte du champ de pressions interstitielles situé dans le rectangle ci-dessous.



En comparaison avec un régime hydrostatique où tous les points (d'un même côté de l'écran) sont associés à la même charge hydraulique (correspondant au toit de la nappe du côté considéré), le développement d'un régime d'écoulement se traduit par une charge hydraulique variable avec la profondeur de chaque côté de l'écran.

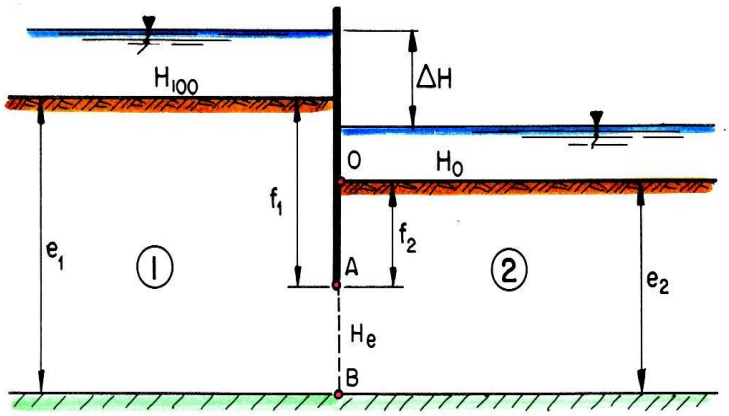
La pression interstitielle en un point donné est reliée à la charge hydraulique à l'aide de la relation suivante :

$$u_A = (h_A - z_A) \cdot \gamma_w$$

Où γ_w est le poids volumique de l'eau.

D.2.2.1.2. *Calcul du gradient hydraulique*

L'hypothèse $k_2 \sim k_3$ permet d'assimiler le terrain dans lequel se développe le régime d'écoulement à un monocouche homogène reposant sur un fond étanche. Cela permet d'appliquer le modèle de Mandel pour l'estimation de la charge hydraulique au pied de l'écran H_A.



- H_{100} charge hydraulique côté terre (correspondant au niveau de nappe initial)
- H_0 charge hydraulique côté fouille
- ΔH perte de charge totale
- e_1 épaisseur totale du terrain côté terre jusqu'au toit du fond étanche
- f_1 épaisseur du terrain côté terre jusqu'à la base de l'écran
- e_2 épaisseur totale du terrain côté fouille jusqu'au toit du fond étanche
- f_2 épaisseur du terrain côté fouille jusqu'à la base de l'écran
- H_A charge hydraulique en pied de l'écran

Où le « terrain » désigne le milieu dans lequel se développe l'écoulement (dans notre cas, l'ensemble limons + sables denses).

La charge hydraulique en pied de l'écran est estimée à l'aide de la relation :

$$H_A = H_0 + \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}(H_{100} - H_0)$$

Avec :

- $\rho_i = \pi / \left(2 \cdot ln\left\{2 \cdot cotg(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{f_i}{e_i}\right\}\right)$ pour $\frac{f_i}{e_i} \leq 0.5$
- $\rho_i = \frac{2}{\pi} ln\left\{2 \cdot cotg(\frac{\pi}{4} \cdot \left(1 - \frac{f_i}{e_i}\right)\right\}$ pour $\frac{f_i}{e_i} > 0.5$

Application au projet étudié – cas de la phase 3

- H_{100} = +5,0 m (niveau de nappe côté gauche)
- H_0 = -3,0 m (niveau de rabattement côté fouille)
- ΔH = +5,0 – (-3,0) = 8 m
- f_1 = +2,0 – (-10,0) = 12 m
- e_1 = +2,0 – (-15,0) = 17 m
- f_2 = -3,0 – (-10,0) = 7 m
- e_2 = -3,0 – (-15,0) = 12 m

$$\frac{f_1}{e_1} = \frac{12}{17} = 0.706 > 0.5 \quad \rightarrow \quad \rho_1 = \frac{2}{\pi} ln\left\{2 \cdot cotg(\frac{\pi}{4} \cdot \left(1 - \frac{f_1}{e_1}\right)\right\} \approx 1.4$$

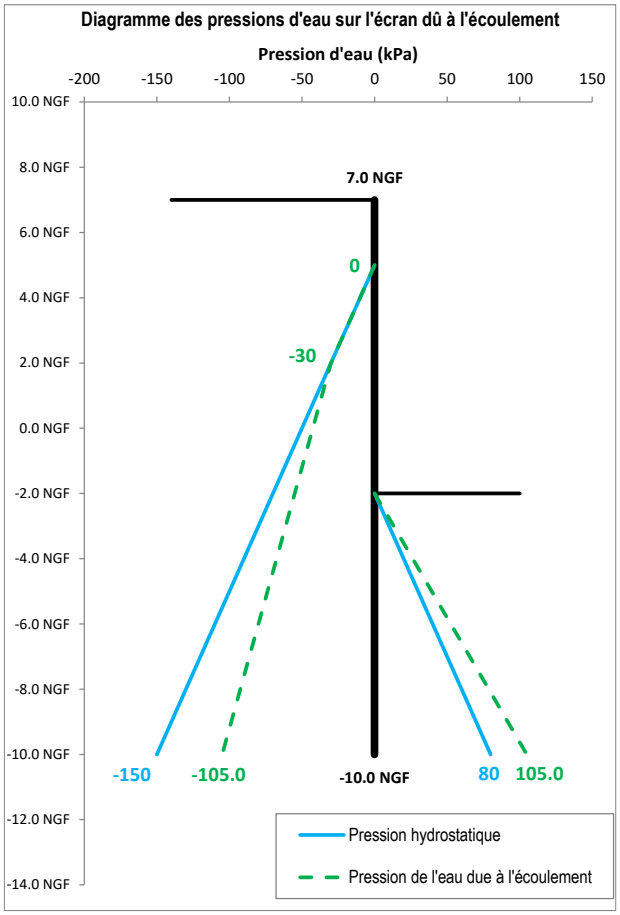
$$\frac{f_2}{e_2} = \frac{7}{12} = 0.583 > 0.5 \quad \rightarrow \quad \rho_2 = \frac{2}{\pi} ln\left\{2 \cdot cotg(\frac{\pi}{4} \cdot \left(1 - \frac{f_1}{e_1}\right)\right\} \approx 1.1$$

$$\boldsymbol{H_A} = H_0 + \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}(H_{100} - H_0) = -3 + \frac{1.1}{1.4 + 1.1}\left(5 - (-3)\right) \approx +\mathbf{0.5}\boldsymbol{m}$$

La pression interstitielle en pied de paroi sera de :

$$\boldsymbol{u_A} = (H_A - z_A) \cdot \gamma_w = \big(0.5 - (-10.0)\big) \cdot 10\ kN/m^3 = 105\ kPa \approx \mathbf{105\ kPa}$$

La figure suivante présente le profil « moyen » des pressions interstitielles de chaque côté de l'écran, en superposition avec celui du régime hydrostatique.



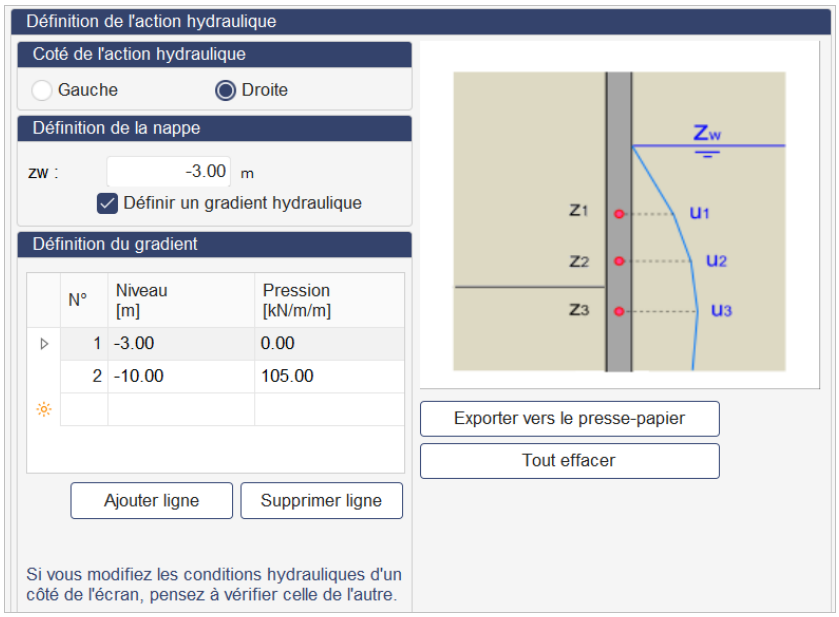
Nota 1 : Il est à noter qu'en l'absence de fond étanche, l'application du modèle de Mandel conduit à $H_A = (H_{100}+H_0) / 2 = 1{,}00$ m et $u_A = 110$ kPa.

Nota 2 : Dans la pratique, il est d'usage de considérer un régime hydrostatique côté terre même en présence d'un régime d'écoulement (approche sécuritaire).

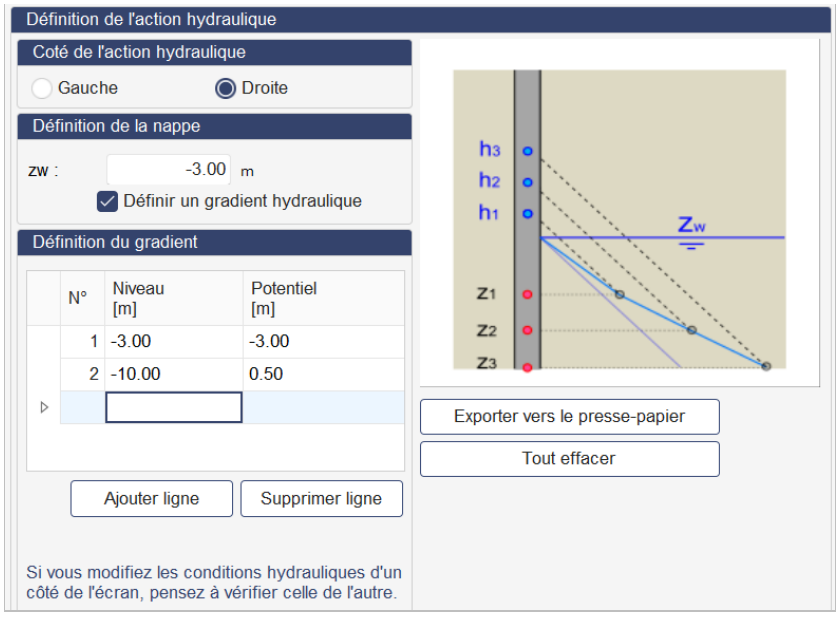
D.2.2.1.3. *Définition du gradient hydraulique avec K-Réa*

La modélisation du gradient hydraulique dans K-Réa peut être menée de deux façons :

- **Option 1** : définition d'un profil de pressions (z, u(z));



- **Option 2** : définition d'un profil de potentiels (ou charges) hydrauliques (u, h(z))

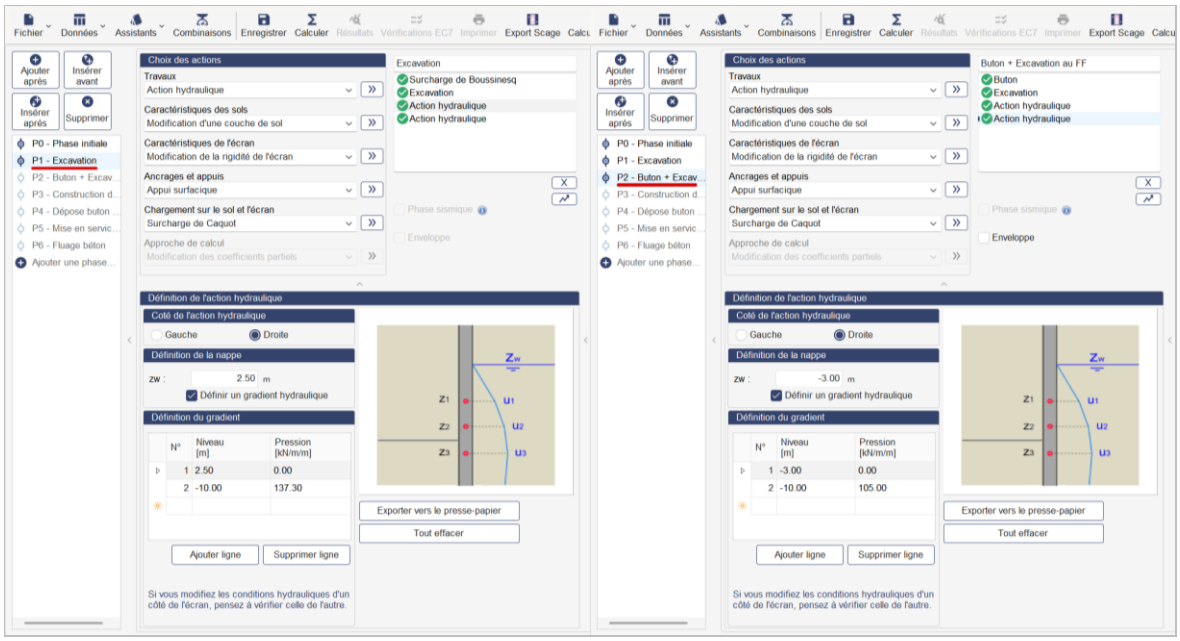


D.2.2.1.4. *Phasage*

La prise en compte du gradient hydraulique nécessite d'opérer les modifications suivantes.

- « Action hydraulique » à droite avec « définition d'un gradient hydraulique » :

Phase 1: z_w = +2,50 m		**Phase 2** : z_w = -3,0 m	
Niv. (m)	Pression (kN/m/m)	Niv. (m)	Pression (kN/m/m)
+2,5	0,0	-3,0	0,0
-10,0	137,3	-10,0	105,0



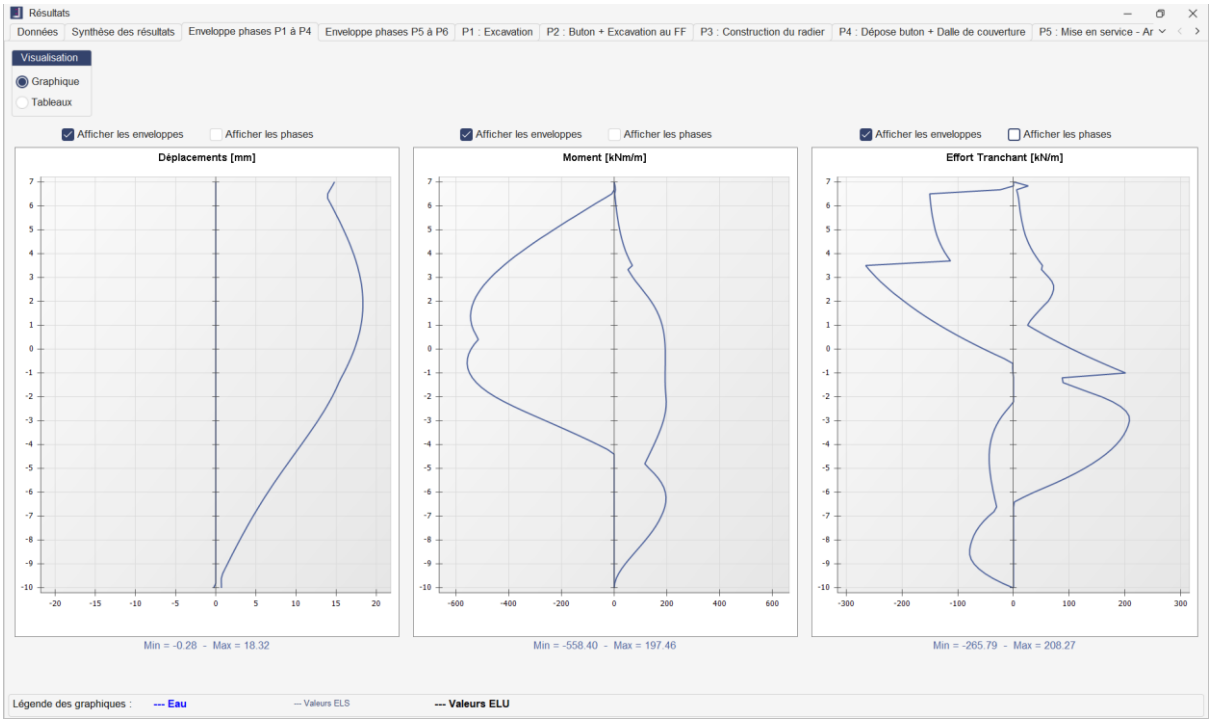
Calcul et résultats

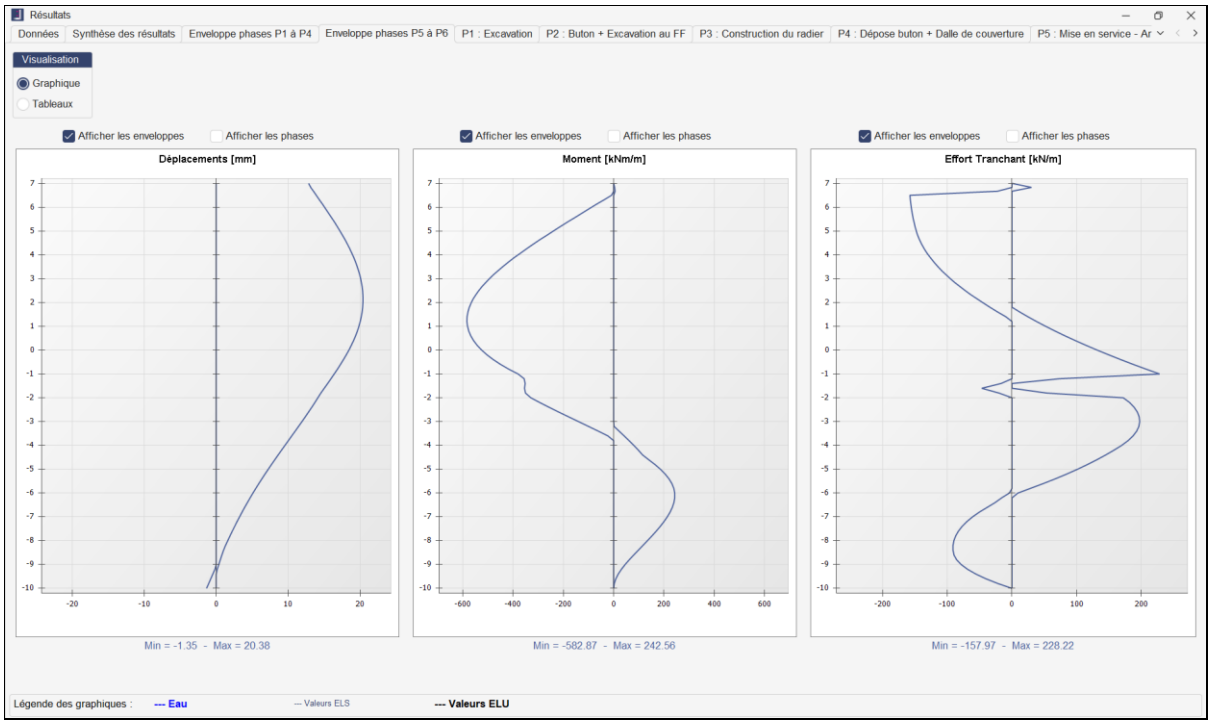
Relancer le calcul et accéder aux résultats. La figure ci-dessous présente la synthèse des résultats obtenus.

Résultats

Données | Synthèse des résultats | Enveloppe phases P1 à P4 | Enveloppe phases P5 à P6 | P1 : Excavation | P2 : Buton + Excavation au FF | P3 : Construction du radier | P4 : Dépose buton + Dalle de cou

N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées	F,k buton n°1 [kN/m]	F,k appui surfacique n°1 [kN/m]	M,k appui surfacique n°1 [kNm/m]	F,k appui surfacique n°2 [kN/m]	M,k appui surfacique n°2 [kNm/m]
P1	14.79	14.79	197.46	325.59	71.93	4.354	-	-	-	-	-
P2	12.90	16.64	-558.40	280.89	-265.52	1.546	317.44	-	-	-	-
P3	12.97	16.56	-558.20	286.53	-265.79	2.542	317.16	-	-	-	-
P4	12.84	18.32	-545.44	287.42	201.37	2.614	-	157.21	-28.46	222.37	88.61
P5	12.83	18.57	-582.87	286.19	197.52	2.312	-	164.49	-30.73	135.10	130.81
P6	12.73	20.38	-410.01	291.06	228.22	2.464	-	130.00	-25.02	282.03	120.55
Extrema	14.79	20.38	-582.87	325.59	-265.79	1.546	317.44	164.49	-25.02	282.03	120.55





Lors de cette 2ème étape, nous obtenons les résultats « enveloppe » suivants :

	Phases transitoires	**Phases définitives**
	Ph. 1 à 4	*Ph. 5 et 6*
Déplacement	1,8 cm	2,0 cm
Moment fléchissant	560 kNm/m	580 kNm/m
Effort tranchant	265 kN/m	230 kN/m
Rapport de butées	1,5	2,3

Nous notons que le rapport de butées est inférieur en phase provisoire à celui obtenu lors de l'étape 1 (1,5 < 2,0). Cette diminution s'explique par la diminution de la contrainte effective côté fouille, elle-même engendrée par l'augmentation de la pression d'eau du fait de l'écoulement.

Nous constatons que la prise en compte d'un écoulement augmente les sollicitations dans la paroi. En effet, le moment fléchissant et l'effort tranchant maximaux ont augmenté entre les étapes 1 et 2. L'augmentation maximale est de l'ordre de 8 %.

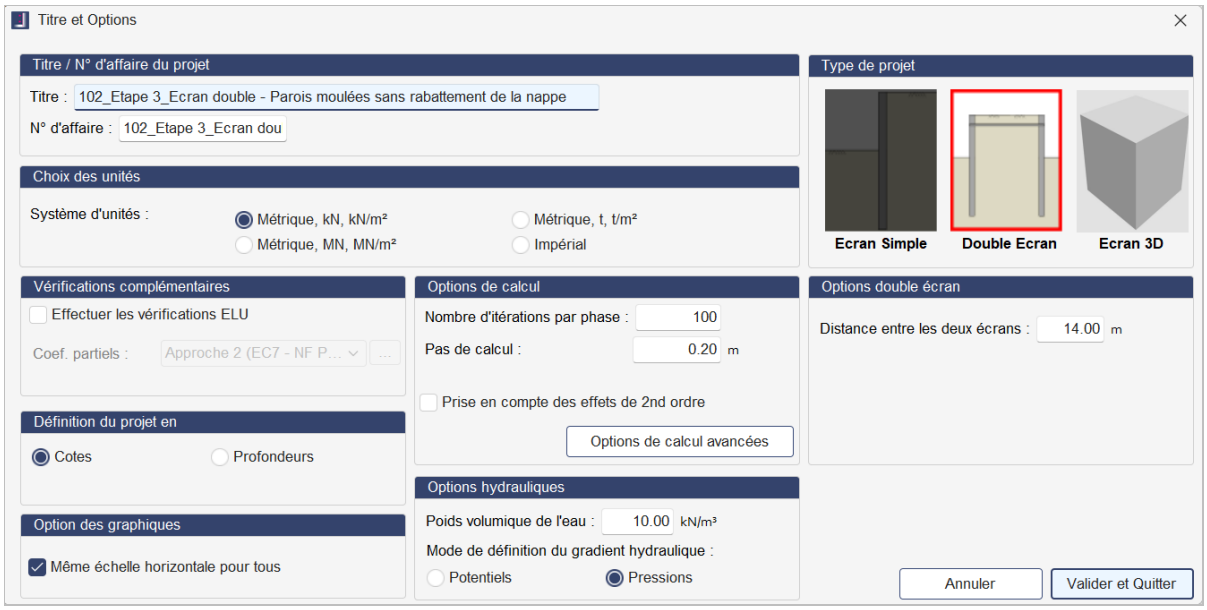
D.2.3 Etape 3 : Passage à un calcul double-écran

Données générales

Cette étape vise à illustrer l'équivalence du calcul précédent avec celui d'un double écran parfaitement symétrique.

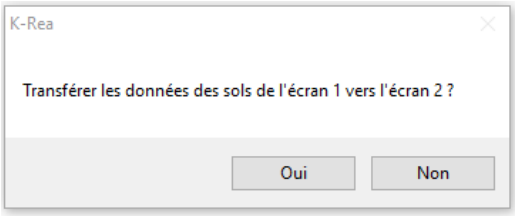
Cliquer sur « Enregistrer sur » dans le menu Fichier. Nommer le fichier, par exemple : « Exemple 2 – Etape 3 ».

Aller dans le menu « Données » et cliquer sur « Titre et Options ». Dans la partie Type de projet, cliquer sur « Double-écran ».

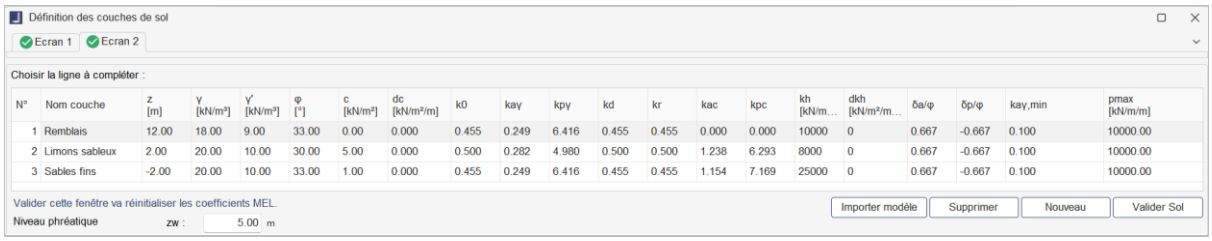


Cliquer sur **Valider et quitter**.

K-Réa propose alors de transférer les données des sols de l'écran 1 vers l'écran 2.



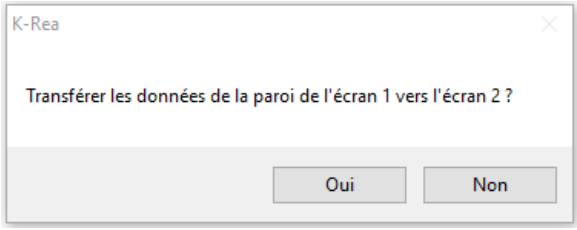
Cliquer sur **Oui** pour copier automatiquement les couches de sols de l'écran 1 vers l'écran 2.

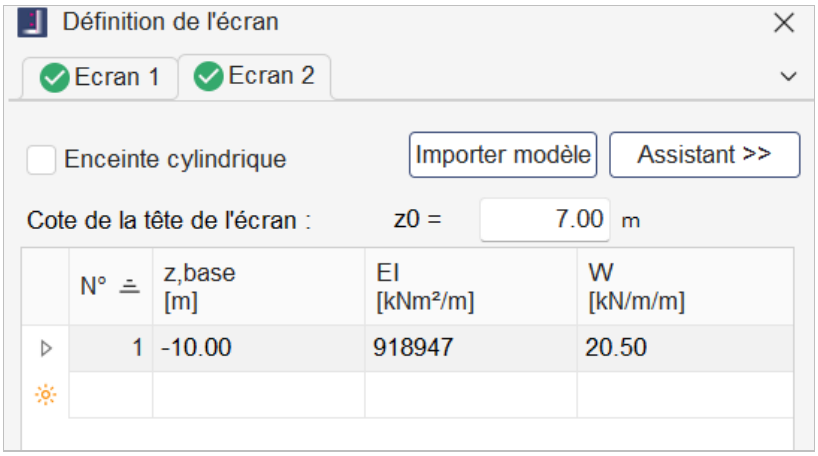


N°	Nom couche	z [m]	γ [kN/m³]	γ' [kN/m³]	φ [°]	c [kN/m²]	dc [kN/m²/m]	k0	kay	kpy	kd	kr	kac	kpc	kh [kN/m...	dkh [kN/m²/m...	δa/φ	δp/φ	kay,min	pmax [kN/m/m]
1	Remblais	12.00	18.00	9.00	33.00	0.00	0.000	0.455	0.249	6.416	0.455	0.455	0.000	0.000	10000	0	0.667	-0.667	0.100	10000.00
2	Limons sableux	2.00	20.00	10.00	30.00	5.00	0.000	0.500	0.282	4.980	0.500	0.500	1.238	6.293	8000	0	0.667	-0.667	0.100	10000.00
3	Sables fins	-2.00	20.00	10.00	33.00	1.00	0.000	0.455	0.249	6.416	0.455	0.455	1.154	7.169	25000	0	0.667	-0.667	0.100	10000.00

Cliquer ensuite sur **Valider et quitter**.

Procéder de la même manière pour transférer les données de la paroi 1 vers la paroi 2 : cliquer sur **Oui**.





Cliquer ensuite sur **Valider et quitter**.

D.2.3.1. Phasage

Il faut à présent remplacer les « butons » par des appuis de type « liaison linéique » et les « appuis surfaciques » par des « liaisons surfaciques ».

La longueur utile de ces nouveaux appuis de liaison sera la distance entre les écrans, soit **14 m**.

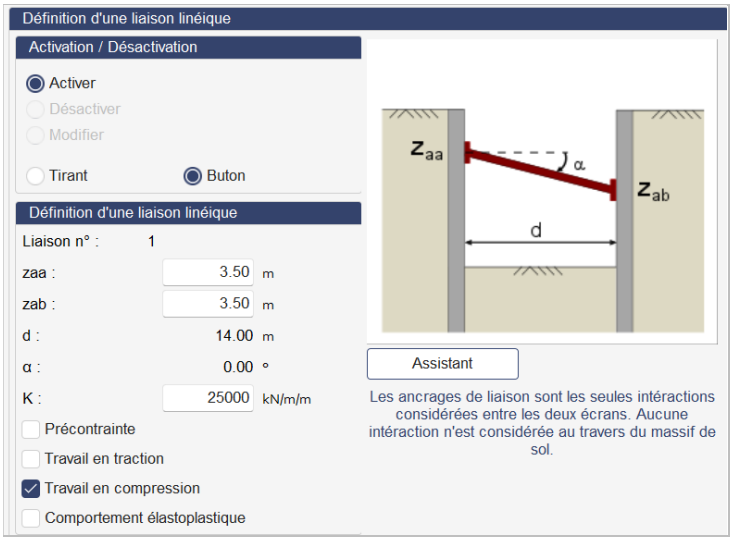
Supprimer d'abord les actions liées aux appuis de type « butons » et « appuis surfaciques » en commençant par celles de type « désactivation ».

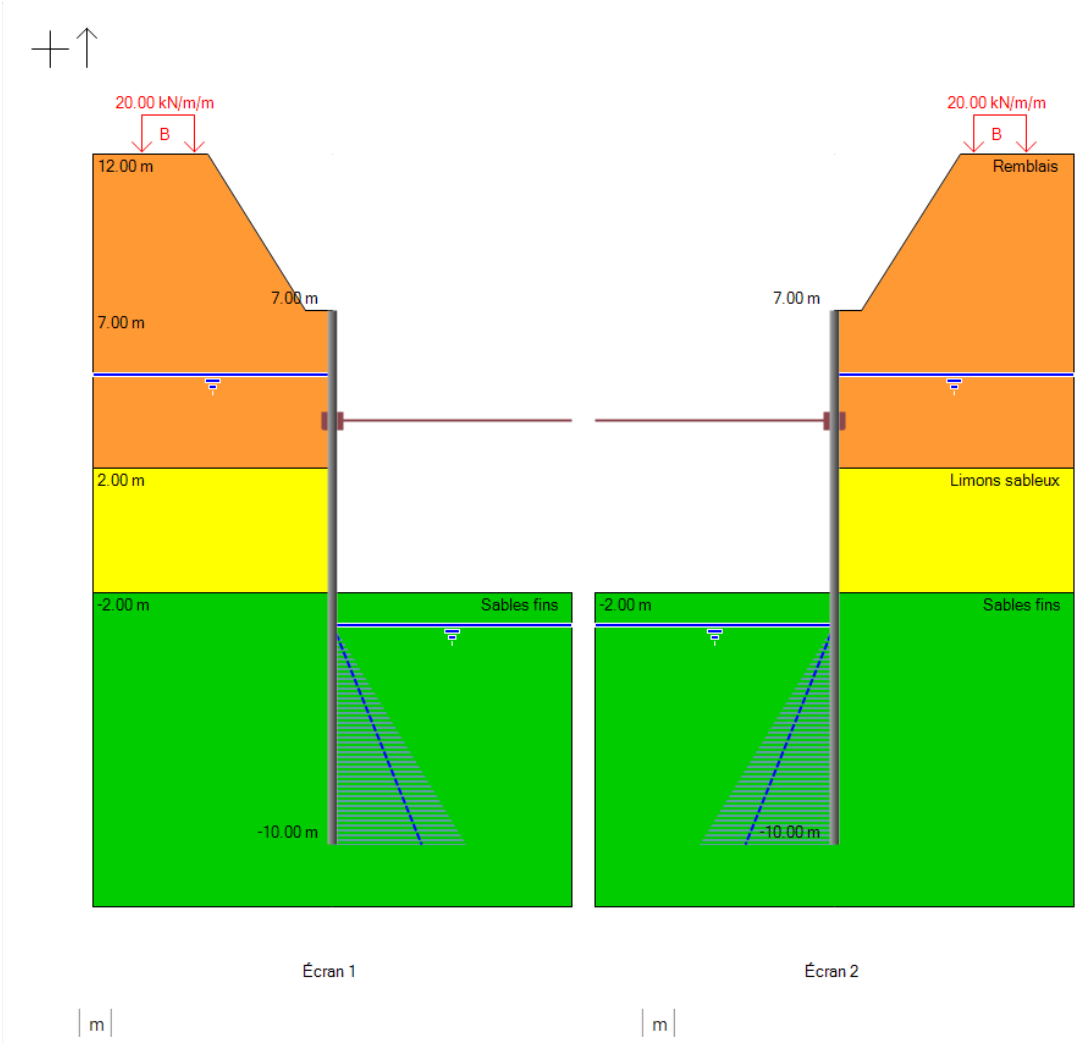
Définir ensuite les « liaisons linéiques » et les « liaisons surfaciques ».

Phase 2

Raideur de la liaison linéique :

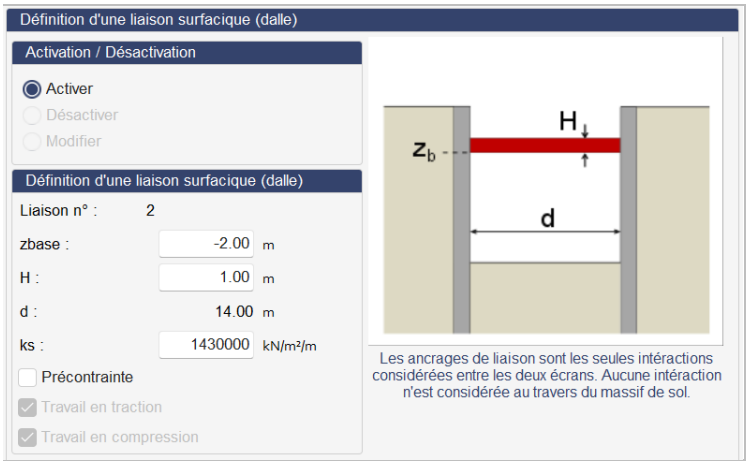
- K = E S / Lu ≈ 25 000 kN/m/m

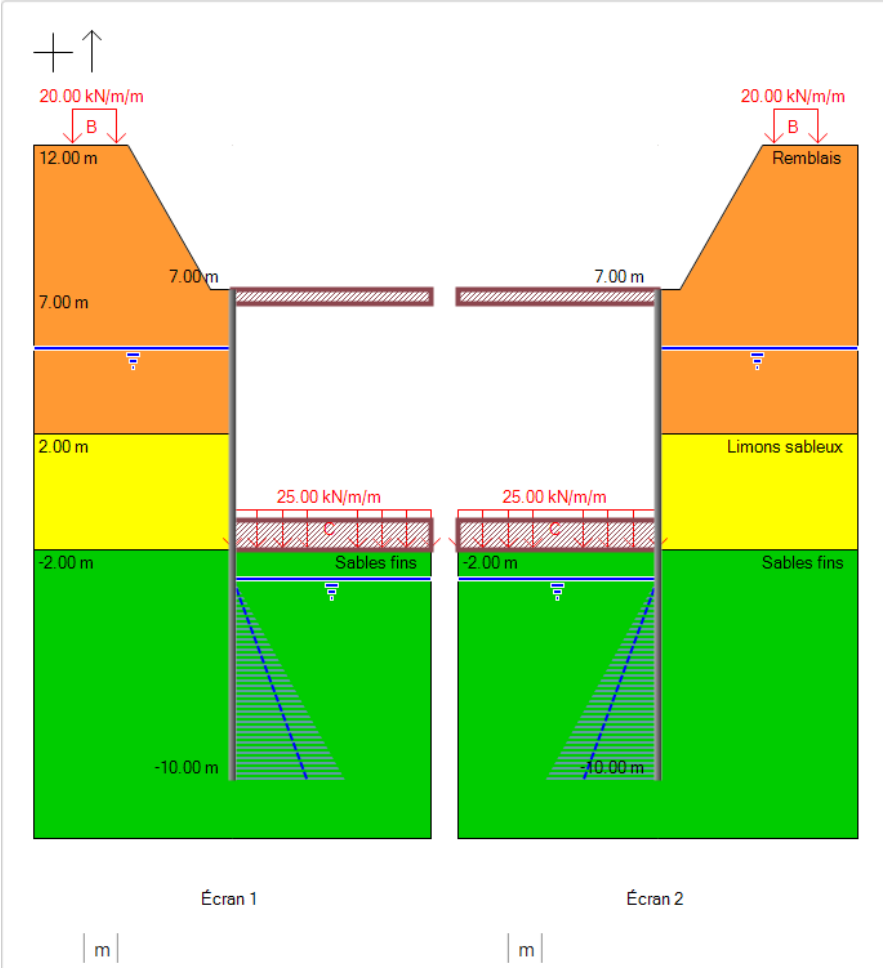




Phase 4

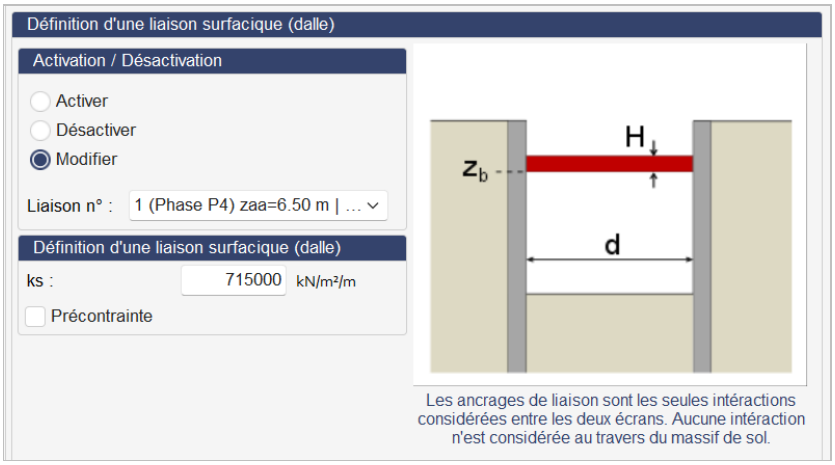
- Raideur de la liaison surfacique (dalle) 1 :
  - zbase = -2
  - Hauteur = 1
  - ks = E / Lu ≈ 1 430 000 kN/m²/m
- Raideur de la liaison surfacique (dalle) 2 :
  - zbase = 6,5
  - Hauteur = 0,5
  - ks = E / Lu ≈ 1 430 000 kN/m²/m

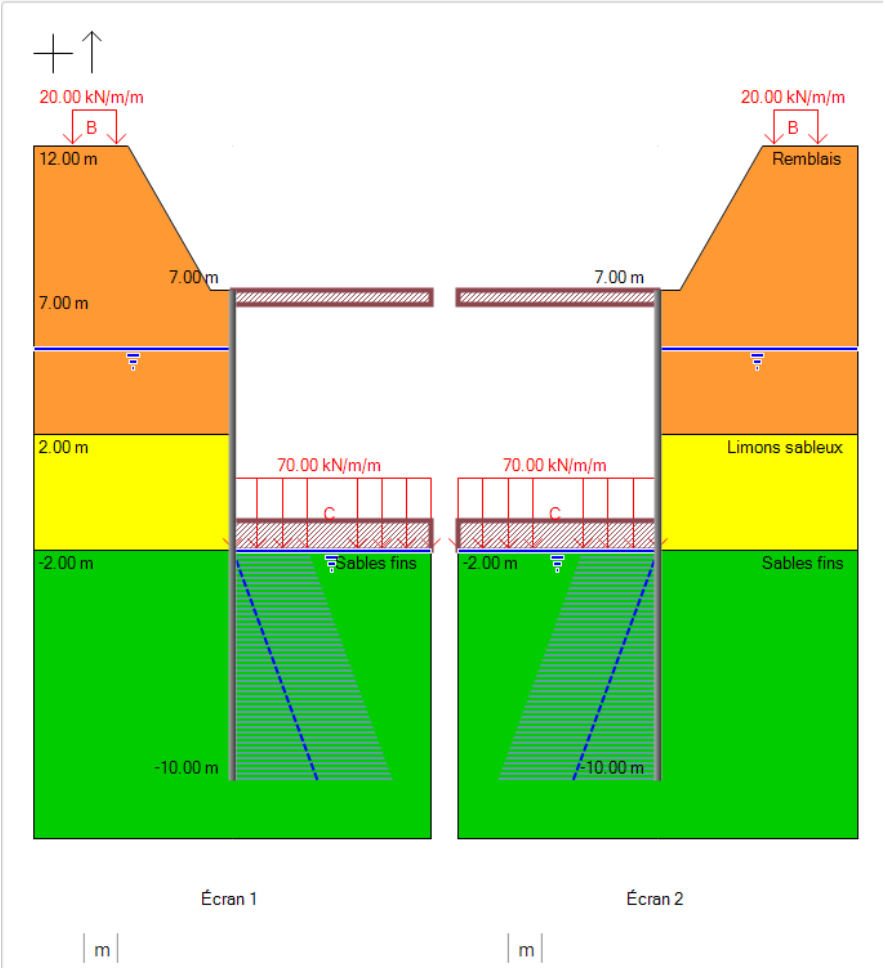




Phase 6

- Modification de la raideur de la liaison surfacique (dalle) 1 :
  - ks = E / Lu ≈ 715 000 kN/m²/m
- Modification de la raideur de la liaison surfacique (dalle) 2 :
  - ks = E / Lu ≈ 715 000 kN/m²/m





D.2.3.2. Calcul et résultats

Lancer le calcul et accéder aux résultats. Ceux-ci sont strictement identiques à ceux issus du calcul en écran simple (puisqu'il s'agit d'une fouille parfaitement symétrique).

Résultats

Données | Synthèse des résultats | Enveloppe phases P1 à P4 - Écran 1 | Enveloppe phases P5 à P6 - Écran 1 | Enveloppe phases P1 à P4 - Écran 2 | Enveloppe phases P5 à P6 - Écran 2 | P1 : Excav

Écran 1

N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées	F,k liaison linéique n°1 [kN/m]	F,k liaison surfacique n°1 [kN/m]	M,k liaison surfacique n°1 [kNm/m]	F,k liaison surfacique n°2 [kN/m]	M,k liaison surfacique n°2 [kNm/m]
P1	14.79	14.79	197.46	325.59	71.93	4.354	-	-	-	-	-
P2	12.90	16.64	-558.40	280.89	-265.52	1.546	317.44	-	-	-	-
P3	12.97	16.56	-558.20	286.53	-265.79	2.542	317.16	-	-	-	-
P4	12.84	18.32	-545.44	287.42	201.37	2.614	-	157.21	-28.46	222.37	88.61
P5	12.83	18.57	-582.87	286.19	197.52	2.312	-	164.49	-30.73	135.10	130.81
P6	12.73	20.38	-410.01	291.06	228.22	2.464	-	130.00	-25.02	282.03	120.55
Extrema	14.79	20.38	-582.87	325.59	-265.79	1.546	317.44	164.49	-25.02	282.03	120.55

Écran 2

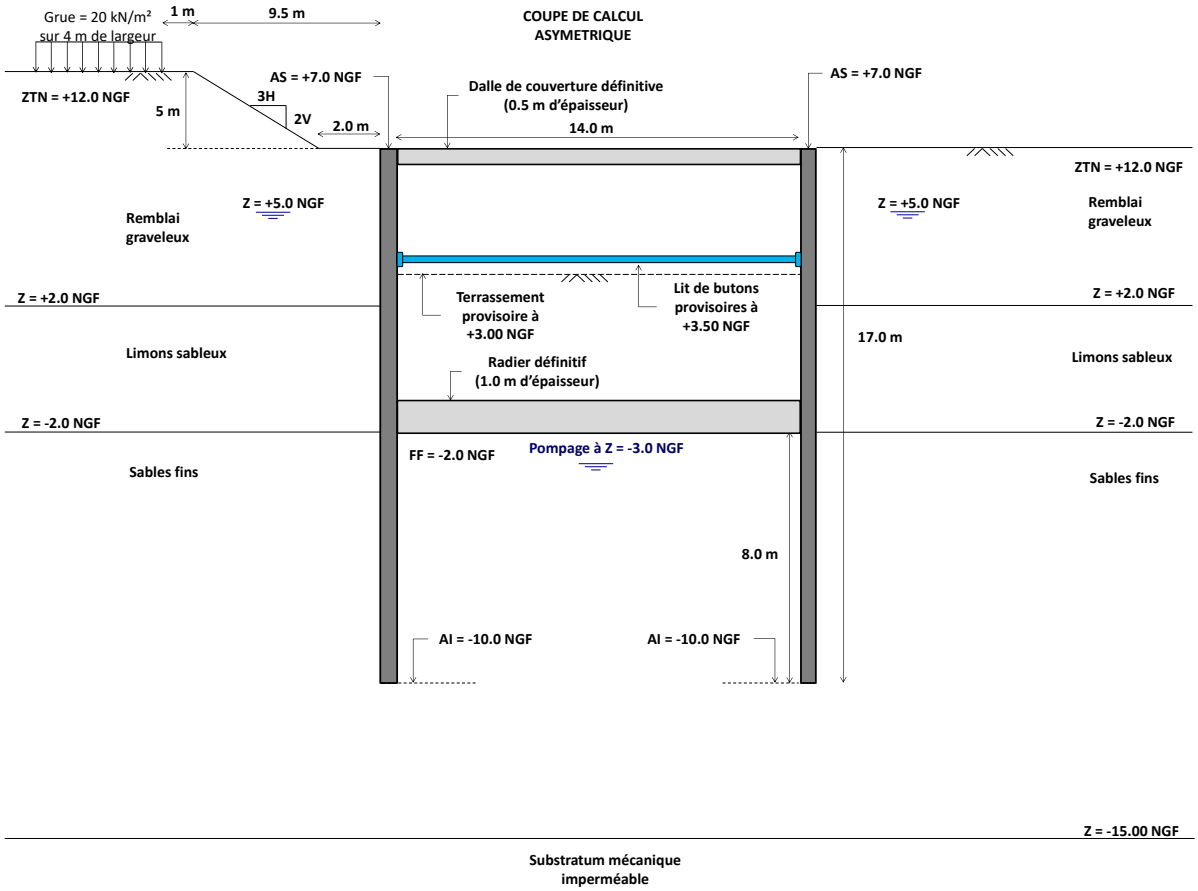
N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées	F,k liaison linéique n°1 [kN/m]	F,k liaison surfacique n°1 [kN/m]	M,k liaison surfacique n°1 [kNm/m]	F,k liaison surfacique n°2 [kN/m]	M,k liaison surfacique n°2 [kNm/m]
P1	-14.79	-14.79	-197.46	325.59	-71.93	4.354	-	-	-	-	-
P2	-12.90	-16.64	558.40	280.89	265.52	1.546	317.44	-	-	-	-
P3	-12.97	-16.56	558.20	286.53	265.79	2.542	317.16	-	-	-	-
P4	-12.84	-18.32	545.44	287.42	-201.37	2.614	-	157.21	-28.46	222.37	88.61
P5	-12.83	-18.57	582.87	286.19	-197.52	2.312	-	164.49	-30.73	135.10	130.81
P6	-12.73	-20.38	410.01	291.06	-228.22	2.464	-	130.00	-25.02	282.03	120.55
Extrema	-14.79	-20.38	582.87	325.59	265.79	1.546	317.44	164.49	-25.02	282.03	120.55

Lors de cette 3ème étape, nous obtenons les résultats « enveloppe » identiques à la 2ème étape, voici les valeurs pour rappel :

	Phases transitoires	**Phases définitives**
	Ph. 1 à 4	*Ph. 5 et 6*
Déplacement	1,8 cm	2,0 cm
Moment fléchissant	560 kNm/ml	580 kNm/ml
Effort tranchant	270 kN/ml	230 kN/ml
Rapport de butées	1,5	2,3

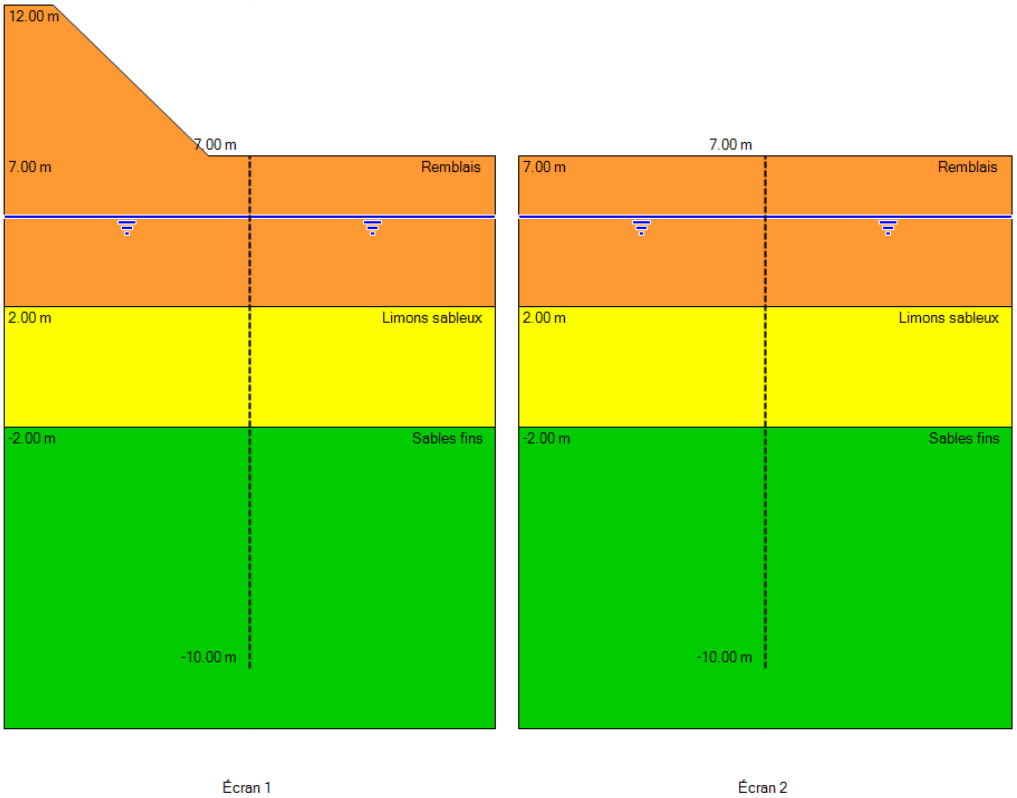
D.2.4 Etape 4 : Cas d'une fouille asymétrique

Dans cette étape, on s'apprête à apprécier l'effet d'une coupe asymétrique par rapport à la coupe symétrique calculée à l'étape 3.
On supprime volontairement le talus et la surcharge à droite de la paroi de droite et l'objectif sera de comparer les résultats à ceux de l'étape 2.

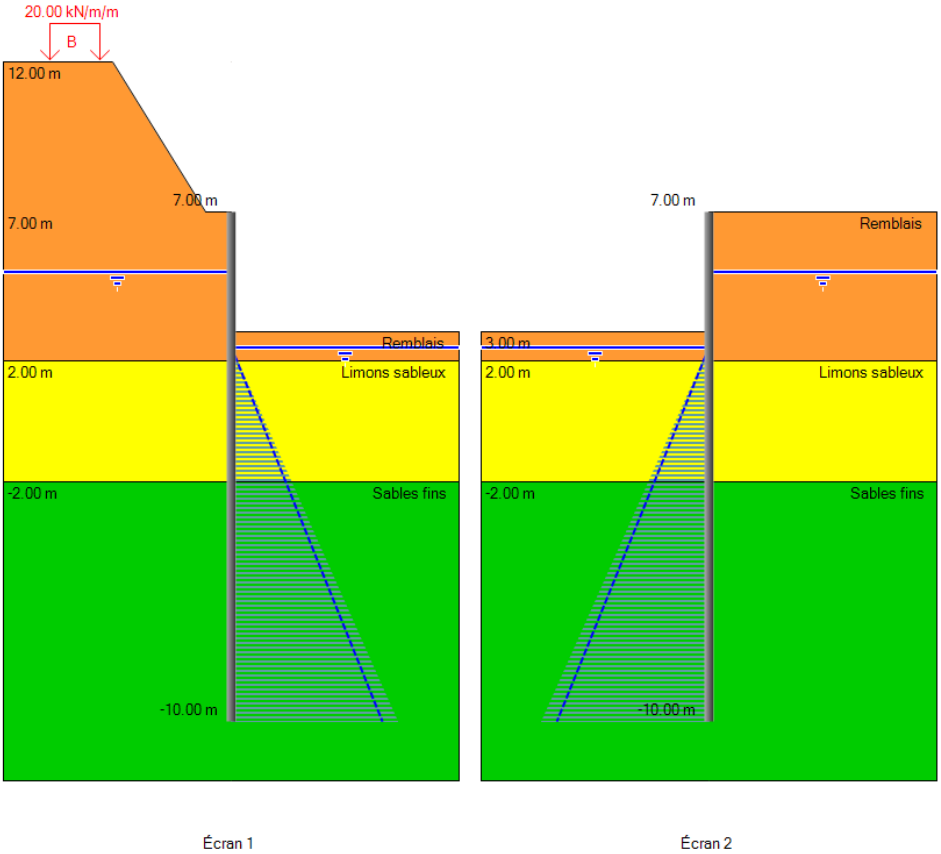


Pour ceci, nous suivrons les consignes suivantes.

Phase initiale : suppression du talus à l'arrière de la paroi moulée de droite (Ecran 2)



Phase 1 : suppression de la surcharge de Boussinesq à l'arrière de la paroi moulée de droite (Ecran 2)



Relancer le calcul et visualiser les résultats.

Résultats

Données | Synthèse des résultats | Enveloppe phases P1 à P4 - Écran 1 | Enveloppe phases P5 à P6 - Écran 1 | Enveloppe phases P1 à P4 - Écran 2 | Enveloppe phases P5 à P6

Écran 1

N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées	F,k liaison linéique n°1 [kN/m]	F,k liaison surfacique n°1 [kN/m]	M,k liaison surfacique n°1 [kNm/m]	F,k liaison surfacique n°2 [kN/m]	M,k liaison surfacique n°2 [kNm/m]
P1	14.79	14.79	197.46	325.59	71.93	4.354	-	-	-	-	-
P2	19.11	20.49	-555.89	283.44	-258.92	1.527	303.25	-	-	-	-
P3	19.26	20.45	-554.61	289.04	-259.02	2.513	303.35	-	-	-	-
P4	20.20	23.14	-539.89	290.06	202.76	2.577	-	150.17	-26.92	211.14	84.04
P5	20.28	23.44	-577.02	290.04	205.38	2.275	-	157.47	-29.18	124.22	126.10
P6	20.08	25.72	-424.68	292.22	225.65	2.397	-	127.50	-23.44	246.99	113.51
Extrema	20.28	25.72	-577.02	325.59	-259.02	1.527	303.35	157.47	-23.44	246.99	113.51

Écran 2

N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées	F,k liaison linéique n°1 [kN/m]	F,k liaison surfacique n°1 [kN/m]	M,k liaison surfacique n°1 [kNm/m]	F,k liaison surfacique n°2 [kN/m]	M,k liaison surfacique n°2 [kNm/m]
P1	-14.03	-14.03	-175.65	306.12	-56.79	6.977	-	-	-	-	-
P2	-9.57	-10.15	320.66	209.66	208.59	1.998	303.25	-	-	-	-
P3	-9.61	-10.07	320.88	208.26	209.20	3.248	303.35	-	-	-	-
P4	-8.43	-11.45	342.89	211.48	-175.75	3.364	-	150.17	-26.92	211.14	84.04
P5	-8.32	-11.64	376.75	212.70	-168.37	3.243	-	157.47	-29.18	124.22	126.10
P6	-8.36	-12.69	272.10	215.76	-189.28	3.508	-	127.50	-23.44	246.99	113.51
Extrema	-14.03	-14.03	376.75	306.12	209.20	1.998	303.35	157.47	-23.44	246.99	113.51

Lors de cette 4ème étape, nous obtenons les résultats « enveloppe » suivants :

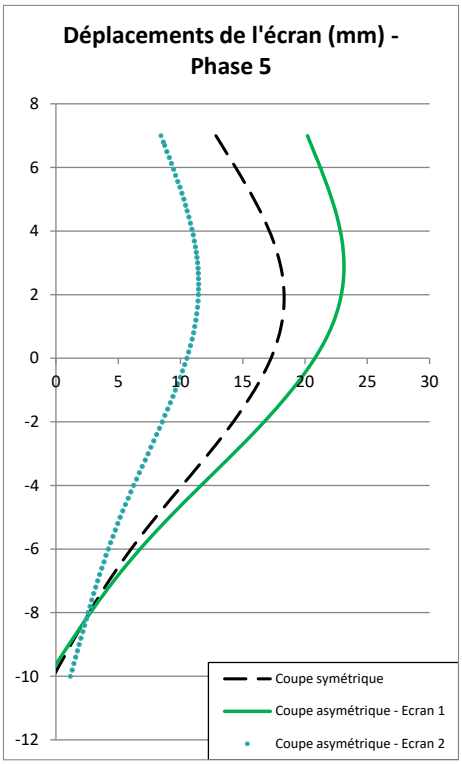
ECRAN 1	**Phases transitoires**	**Phases définitives**
	Ph. 1 à 4	*Ph. 5 et 6*
Déplacement	2,3 cm	2,6 cm
Moment fléchissant	560kNm/m	580 kNm/m
Effort tranchant	260 kN/m	226 kN/m
Rapport de butées	1,5	2,2

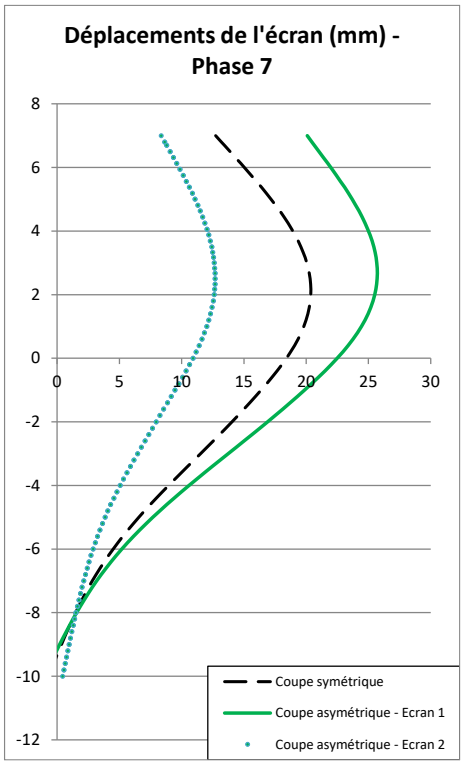
ECRAN 2	**Phases transitoires**	**Phases définitives**
	Ph. 1 à 4	*Ph. 5 et 6*
Déplacement	1,4 cm	1,3 cm
Moment fléchissant	340 kNm/m	380 kNm/m
Effort tranchant	210 kN/m	190 kN/m
Rapport de butées	2,0	3,2

Rappel des résultats du calcul symétrique (étape 3) :

	Phases transitoires	**Phases définitives**
	Ph. 1 à 5	*Ph. 6 et 7*
Déplacement	1,8 cm	2,0 cm
Moment fléchissant	560 kNm/m	580 kNm/m
Effort tranchant	270 kN/m	230 kN/m
Rapport de butées	1,5	2,3

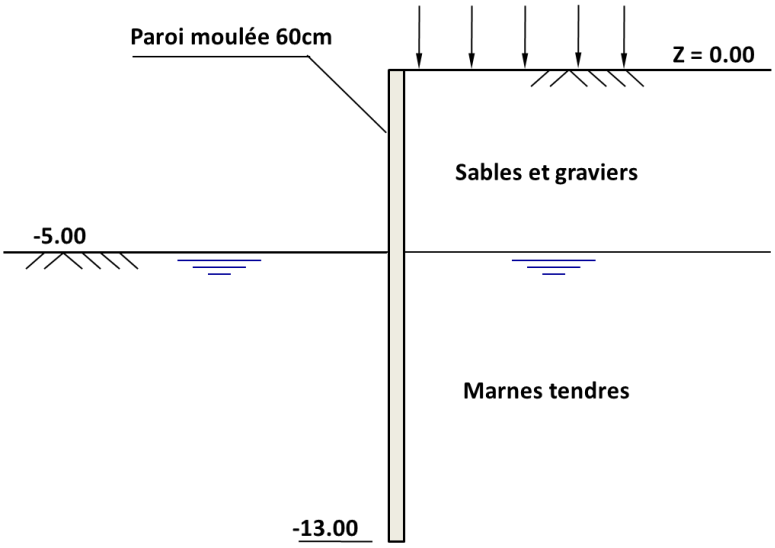
Comparaison des courbes des déplacements de la phase 5 (fin des phases transitoires) et de la phase 7 (fin des phases de service) entre les étapes 3 et 4.





D.3. Tutoriel 3 : Fouille soutenue par écran auto-stable

L'exemple étudié est celui d'une paroi moulée auto-stable (en console) de 60 cm d'épaisseur ancrée de 6 m dans un terrain marneux. La figure ci-dessous illustre les caractéristiques du problème étudié.



Nous détaillerons dans cet exemple les vérifications ELU liées à ce type de configuration.

En particulier, cet exemple servira de base pour illustrer les points suivants :

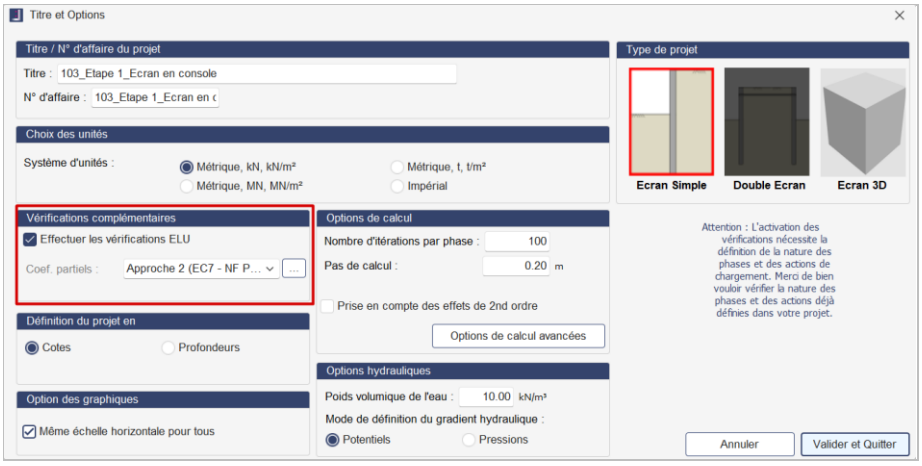
- Comparaison des différentes méthodes MEL proposées dans K-Réa ;
- Comparaison des systèmes de pondération ;
- Equilibre vertical et correction automatique de l'inclinaison de contre-butée ;
- Effet d'une sur-excavation.

D.3.1 Saisie des données

Pour démarrer K-Réa :

- Double-cliquer sur l'icône **K-Réa**.
- Choisir le mode de protection adéquat, conserver la langue par défaut (**Français**) et cliquer sur **OK.**
- Choisir **Nouveau projet** pour accéder au formulaire **Titre et Options**.

D.3.1.1. Titre et options



- Dans le cadre **Type de projet** (à droite), sélectionner "Ecran simple".
- Dans le cadre de **Titre / N° d'affaire du projet**, cliquer dans la ligne blanche 'Titre' et saisir le titre de votre choix. Cliquer dans la ligne blanche 'N° d'affaires' pour rentrer le numéro de votre choix.
- Dans le cadre **Choix des unités** choisir le système d'unités de votre projet, en cochant 'Métrique, kN, kN/m²'.
- Choisir **Définition du projet en** Cotes, ce qui permet d'orienter l'axe vertical vers **le haut.**
- **Vérifications complémentaires** : cocher la case 'Effectuer les vérifications ELU' afin d'activer le calcul aux états limites ultimes pour cet exemple.
- Dans le cadre **Option des graphiques**, conserver la case 'Même échelle horizontale pour tous' cochée.
- Dans le cadre **Options de calcul**, conserver les réglages par défaut : 100 itérations par phase de calcul et un pas de calcul de 0,2 m pour l'écran.
- Dans le cadre **Options hydrauliques**, laisser le poids volumique de l'eau égale à 10,00 kN/m³. Choisir Potentiels comme mode de définition du gradient hydraulique (ceci n'interviendra pas dans les calculs puisque le projet ne comporte pas de rabattement de nappe).

D.3.1.2. Définition des couches de sol

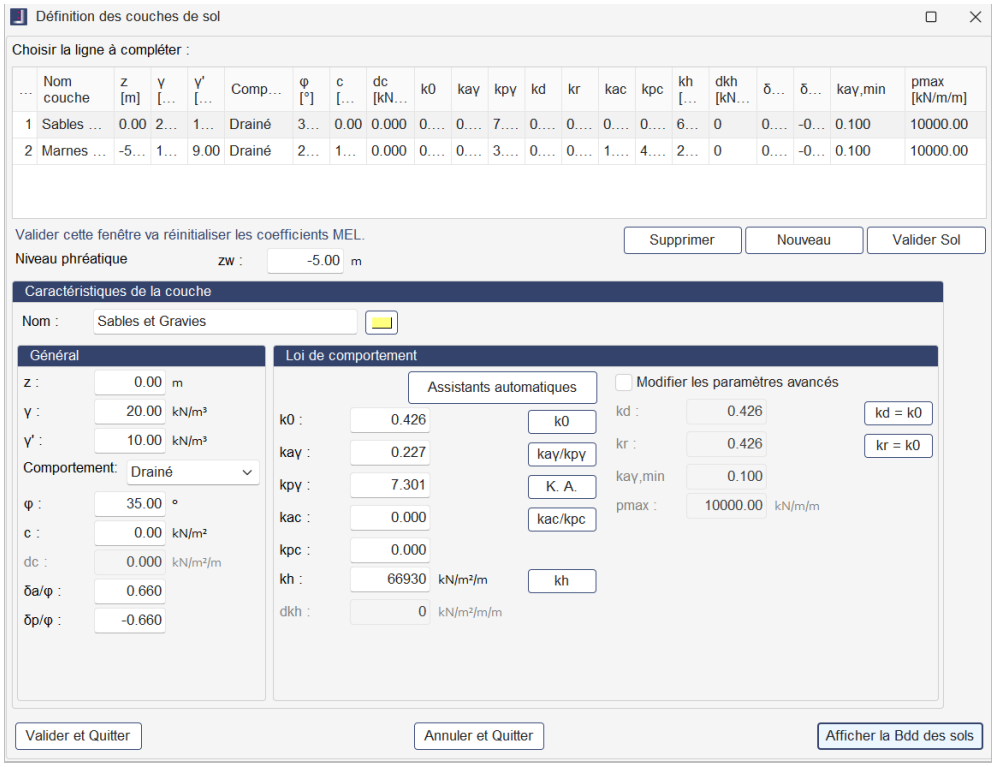
Les caractéristiques générales des deux couches intéressant l'exercice sont récapitulées dans le tableau suivant.

Couche	γ (kN/m³)	γ' (kN/m³)	Comp.	φ (°)	c (kN/m²)	dc (kPa/m²/m)	δ_a/φ (-)	δ_p/φ (-)
Sables et graviers	20	10	Drainé	35	0	0	0,66	-0,66
Marnes tendres	19	9	Drainé	23	10	0	0,66	-0,66

Utiliser ensuite les assistants de K-Réa pour calculer les paramètres permettant de constituer la loi de comportement de chaque couche. Le coefficient de réaction k_h est à prendre selon les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous.

Couche	k_0 (-)	$k_{a\gamma}$ (-)	$k_{p\gamma}$ (-)	k_{ac} (-)	k_{pc} (-)	E_M (kPa)	α (-)	k_h (kN/m³)
Sables et graviers	0,426	0,227	7,301	0	0	20 000	0.33	66 930
Marnes tendres	0,609	0,382	3,194	1,452	4,803	19 800	0.66	26 210

Les autres paramètres sont conservés à leurs valeurs par défaut. Laisser pour cela la case **Modifier les paramètres avancés** décochée. L'écran suivant illustre celui de K-Réa à la suite de ces opérations :



Cliquer sur **Valider et quitter**.

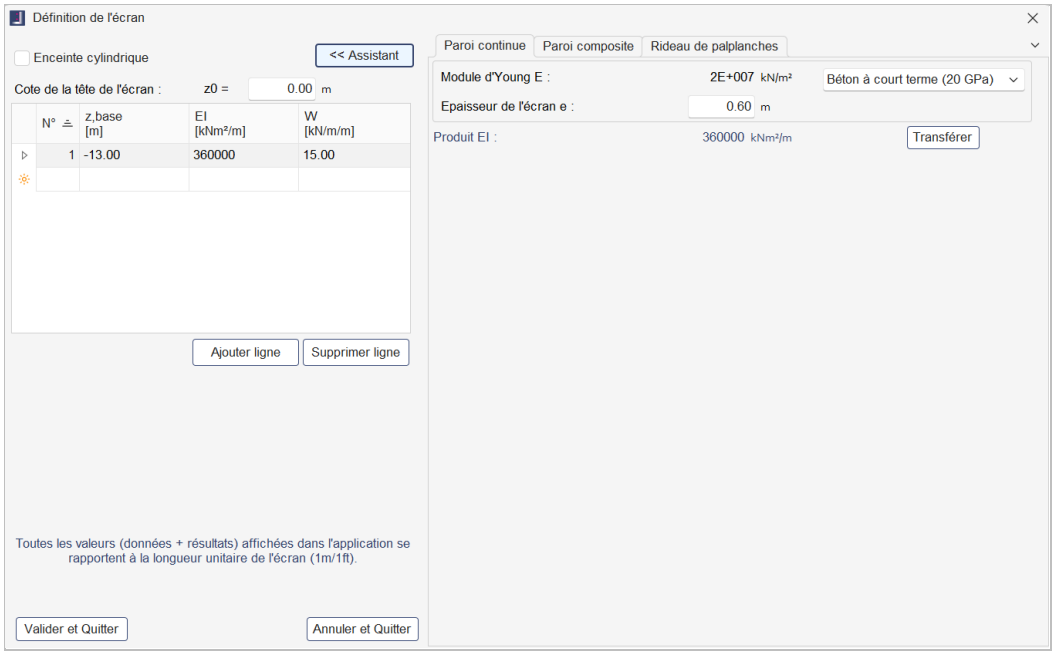
Pour consulter ou modifier les couches de sol ultérieurement, cliquer sur **Menu Données**, puis sur **Définition des couches de sol**.

D.3.1.3. Définition de l'écran

Après avoir validé les caractéristiques des couches, il convient de définir celles de l'écran.

- Cliquer dans la case de saisie pour rentrer le niveau supérieur de l'écran : z_0 = +0,00 m.
- Cliquer sur la première ligne du tableau (correspondant à la première section d'écran à définir, qui sera en l'occurrence la seule pour cet exemple), saisir dans la première colonne la base de la section, soit ici la cote z_{base} = -13,0 m.
- Cliquer ensuite sur le bouton **Assistant** pour déterminer le produit EI de la paroi
    - Choisir l'onglet Paroi continue, puis sélectionner « Béton à court terme (20 GPa) ».
    - Saisir ensuite l'épaisseur de l'écran e 0,60 m.
- Cliquer sur **Transférer** puis quitter l'assistant.

Renseigner ensuite le poids surfacique de l'écran W = 0,6 m x 25 kN/m^3 = 15 kN/m/m.
L'écran suivant illustre les manipulations précédentes :



Enfin, cliquer sur **Valider et quitter** pour prendre en compte les valeurs saisies et les voir apparaître avec la représentation graphique des données initiales du projet.
Pour modifier les caractéristiques de la paroi ultérieurement, cliquer sur le menu **Données**, puis sur **Définition de l'écran**.

D.3.2 Définition du phasage

Il convient à présent de définir les actions à considérer dans chaque phase de construction.

Ces actions sont récapitulées dans le tableau ci-dessous à partir du phasage qui a été retenu :

PHASE	ACTIONS
Initiale	Vierge
Phase 1 Transitoire	Excavation à la cote – 5,00 m Surcharge de Caquot à droite de 25 kN/m/m – nature variable
Phase 2 Durable	Modification de la surcharge de Caquot 10 kN/m/m – nature variable Modification de la nature de la phase « transitoire => durable »

D.3.2.1. Phase initiale

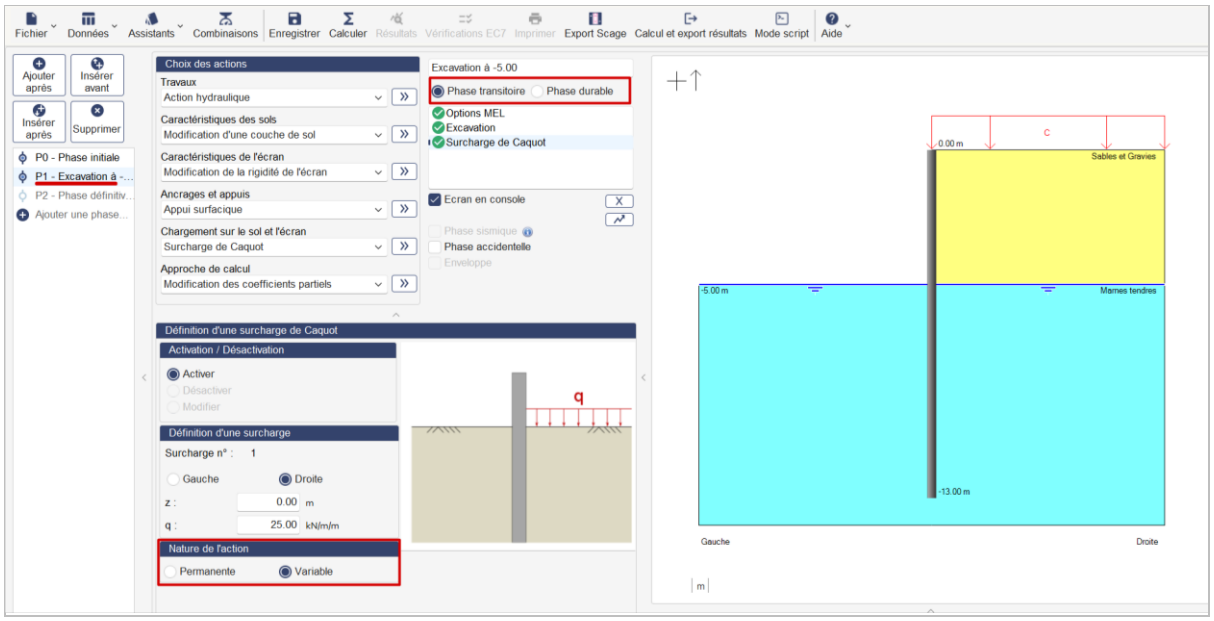
Aucune action n'est à définir dans cette phase.

D.3.2.2. Phase 1

Pour créer cette nouvelle phase de calcul, cliquer sur **Ajouter une phase** sous l'item de la phase initiale (« P0 »).

Cette phase est à définir comme « phase transitoire ». Deux actions sont ensuite à définir :

- Action « Excavation » avec z_h = -5,00 m à gauche ;
- Action « Surcharge de Caquot » de q = 25 kN/m/m, de nature « variable », appliquée à droite, à z = +0,00.

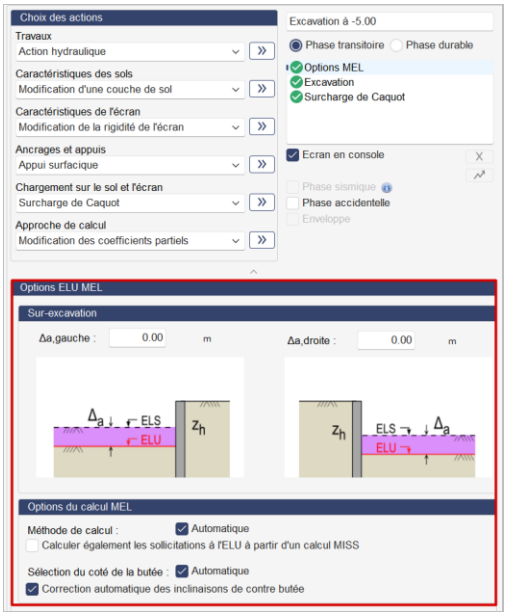


Ce projet (et donc cette phase) n'inclut aucun ancrage, et l'écran est en console (autostable). De plus, nous avons activé les vérifications ELU lors de la définition des propriétés du projet.

Par conséquent :

- La case Ecran en console est automatiquement cochée, ce qui implique qu'un modèle « MEL » sera considéré pour vérifier l'équilibre de l'écran à l'ELU ;
- L'action Options MEL a été automatiquement ajoutée et concerne les options suivantes :
    - Saisie d'une sur-excavation, à gauche ou à droite (laisser à zéro pour l'instant) ;
    - Choix de la méthode de calcul : automatique ou manuel (MEL – F / MEL – D et choix de la cote de calcul pour la base de l'écran) ;
    - Sélection du côté de la butée : automatique ou manuelle (gauche ou droite) ;
    - Correction des inclinaisons de contre-butée : automatique / manuelle.

La description de ces options sera détaillée à la fin de l'exercice.



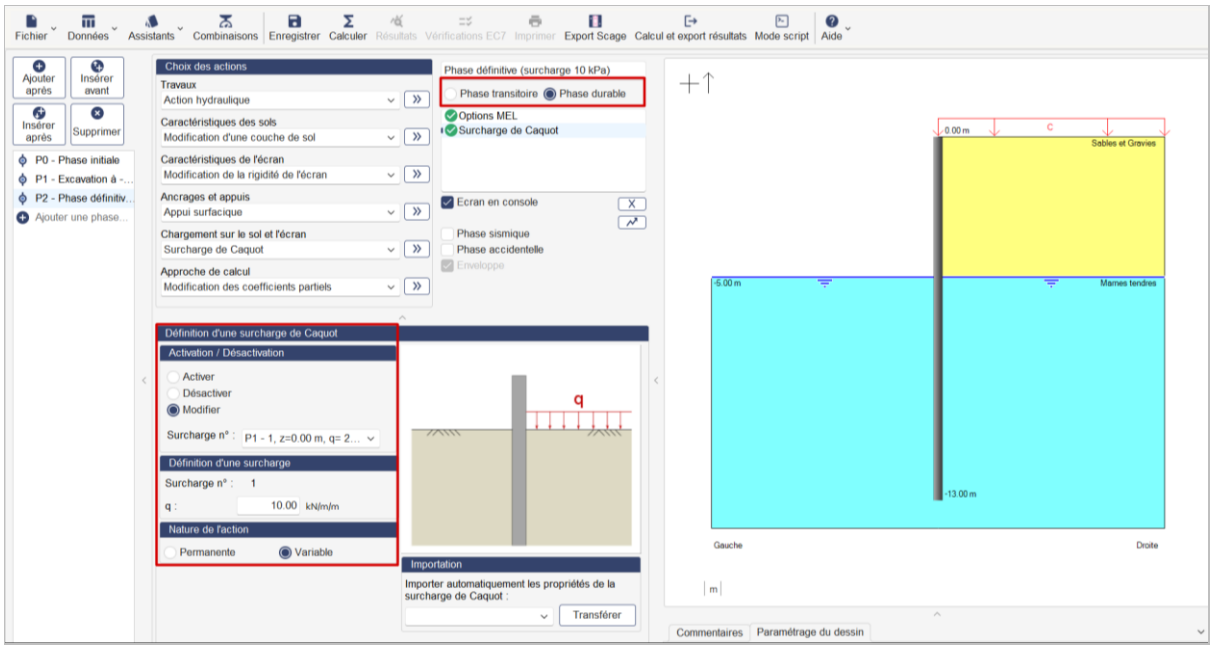
D.3.2.3. Phase 2

Ajouter une nouvelle phase de calcul en cliquant sur **Ajouter une phase**.

Cette phase est à définir comme « phase durable ».

Modifier la « Surcharge de Caquot » définie à la phase précédente :

- Densité q = 10 kN/m/m au lieu 25 kN/m/m
- Nature inchangée (« variable »).



D.3.3 Calculs et résultats

D.3.3.1. Résultats principaux

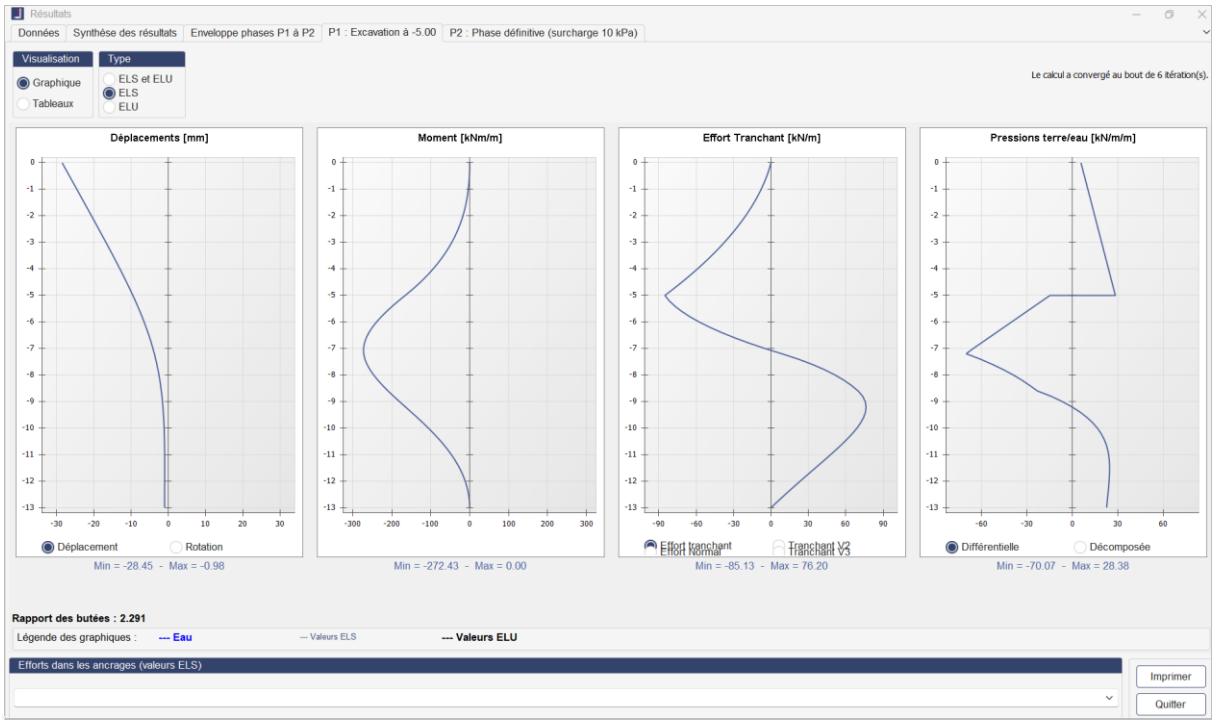
Pour lancer les calculs à la fin de la saisie de l'ensemble des paramètres du projet, cliquer sur **Calculer** sur la barre de boutons.

Pour consulter l'ensemble des résultats proposés dans K-Réa de façon plus détaillée, cliquer sur le bouton **Résultats**.

Afficher ensuite la "Phase 1".

Analysons d'abord les résultats « ELS » : en parallèle du calcul « MEL », K-Réa donne également le résultat d'un calcul ELS basé sur un modèle « MISS ». Ce calcul permet notamment de vérifier les déplacements de la paroi vis-à-vis des critères de conception de l'ouvrage. Ici la flèche maximale est de l'ordre de 3 cm.

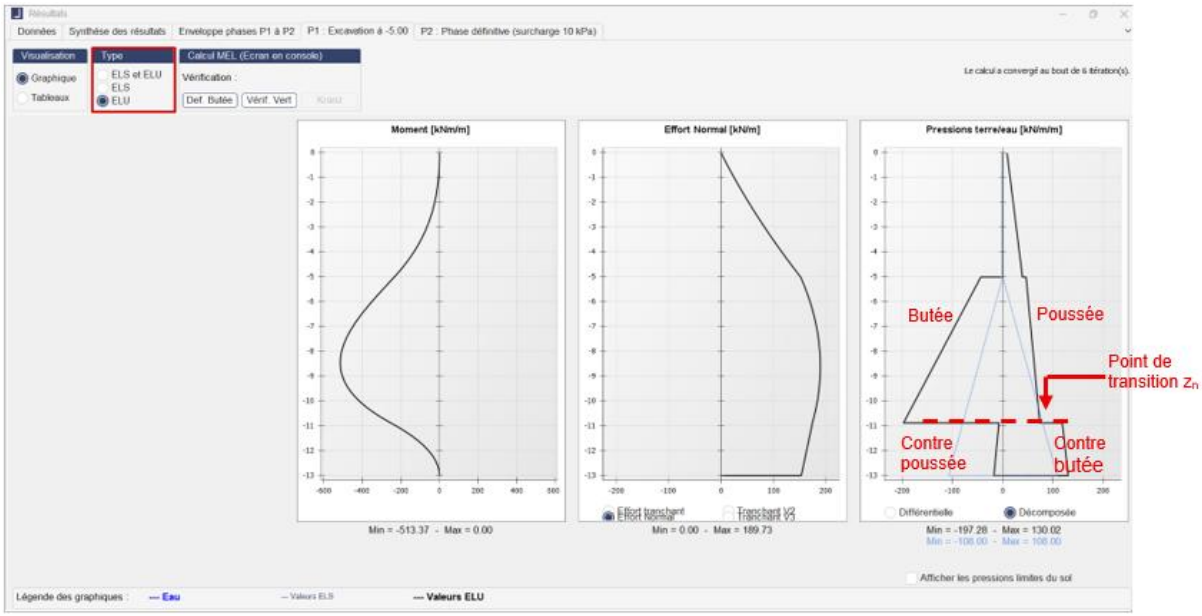
On constate qu'un rapport des butées est également affiché en bas des graphiques (2,29 ici) : s'agissant d'un écran auto-stable, ce rapport n'a aucun sens physique et ne doit pas être utilisé pour justifier la fiche de l'écran vis-à-vis du défaut de butée. Dans ce type de configuration, la fiche doit être réglementairement justifiée par un modèle aux équilibres limites accessible en sélectionnant l'option « ELU » située en haut à gauche de la fenêtre des résultats.



La figure suivante présente les résultats ELU de la phase 1 : seuls les diagrammes des efforts et pressions des terres sont disponibles (pas de déplacements avec le modèle MEL). Les efforts et pressions sont exprimés directement en valeurs de calcul (ELU). Les valeurs maximales sont les suivantes :

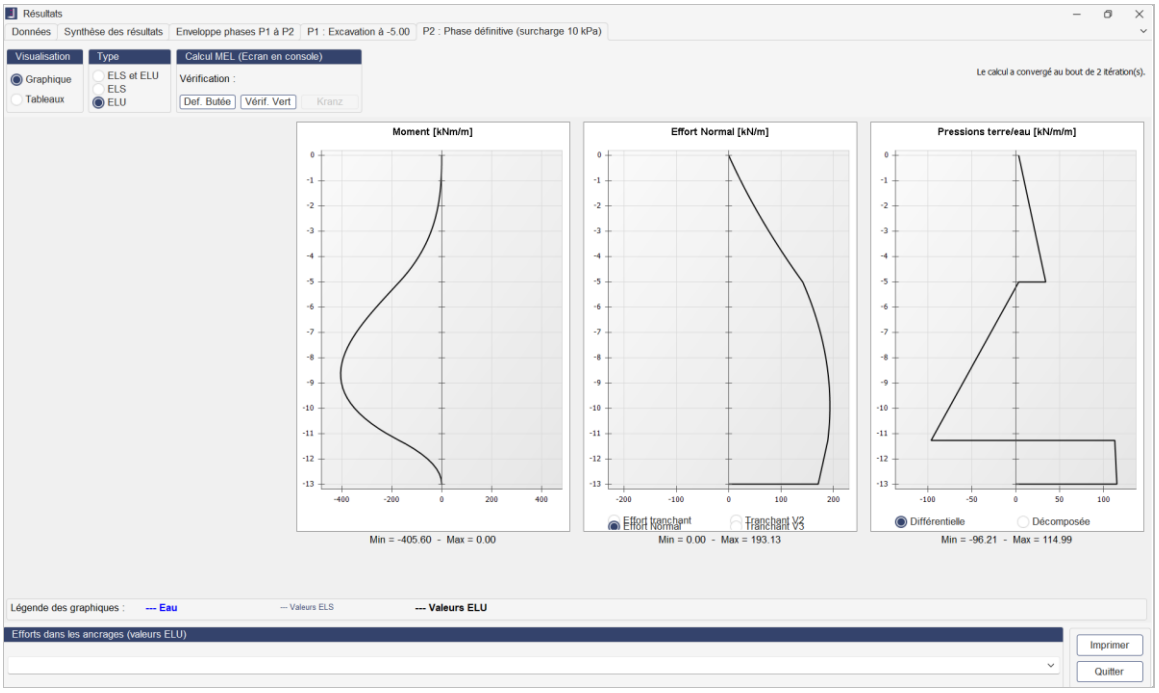
- Moment fléchissant : 514 kNm/m à l'ELU
- Effort tranchant : 237 kN/m à l'ELU
- Effort normal : 190 kN/m à l'ELU

Le diagramme des pressions des terres (à droite) est une illustration du principe du modèle MEL qui consiste à travailler directement avec les valeurs limites des pressions des terres : poussée limite à droite (pondérée) et butée limite à gauche (pondérée) jusqu'au point de transition z_n. En-dessous de ce point de transition, la contre-butée est (partiellement) mobilisée à droite de l'écran, et la contre poussée est mobilisée à gauche.



Dans cette phase, le côté de la butée a été automatiquement choisi par K-Réa comme étant le côté gauche. Ce choix automatique peut être forcé par l'utilisateur dans l'action « Options MEL » accessible pour chaque phase où l'écran est déclaré comme auto-stable.

Accéder ensuite à l'onglet « Phase 2 » pour visualiser les résultats ELU correspondants. La surcharge de Caquot ayant été réduite à 10 kN/m/m dans cette phase, l'amplitude des sollicitations se trouve par conséquent diminuée.

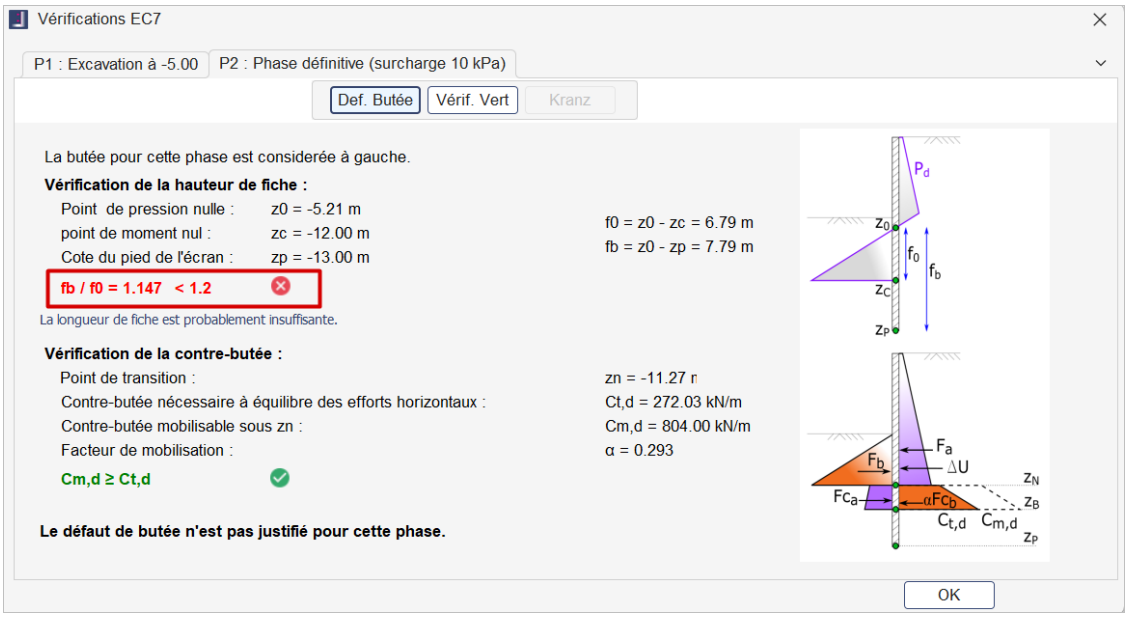


D.3.3.2. Défaut de butée

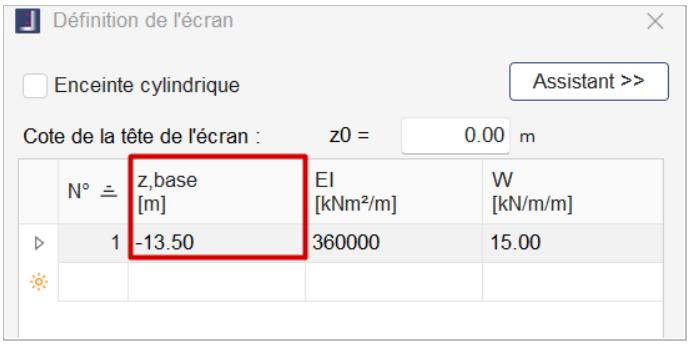
Cliquer à présent sur le bouton « Déf. Butée » pour accéder au détail des vérifications ELU menées par K-Réa en parallèle du calcul des efforts.

On s'intéresse à la phase 2. La fiche de l'écran est conventionnellement comptée à partir du point de pression différentielle nulle z_0 : $f_b = z_0 - z_{pied}$. Réglementairement, la justification de la fiche vis-à-vis du défaut de butée requiert que celle-ci soit au moins égale à 1,2 fois la fiche critique f_0 permettant l'équilibre des moments.

Dans le cas présent, nous avons $f_b = 1{,}15\ f_0 < 1{,}20\ f_0$. La fiche de l'écran est par conséquent insuffisante vis-à-vis du défaut de butée. Un allongement de la fiche est nécessaire afin de satisfaire aux exigences réglementaires.



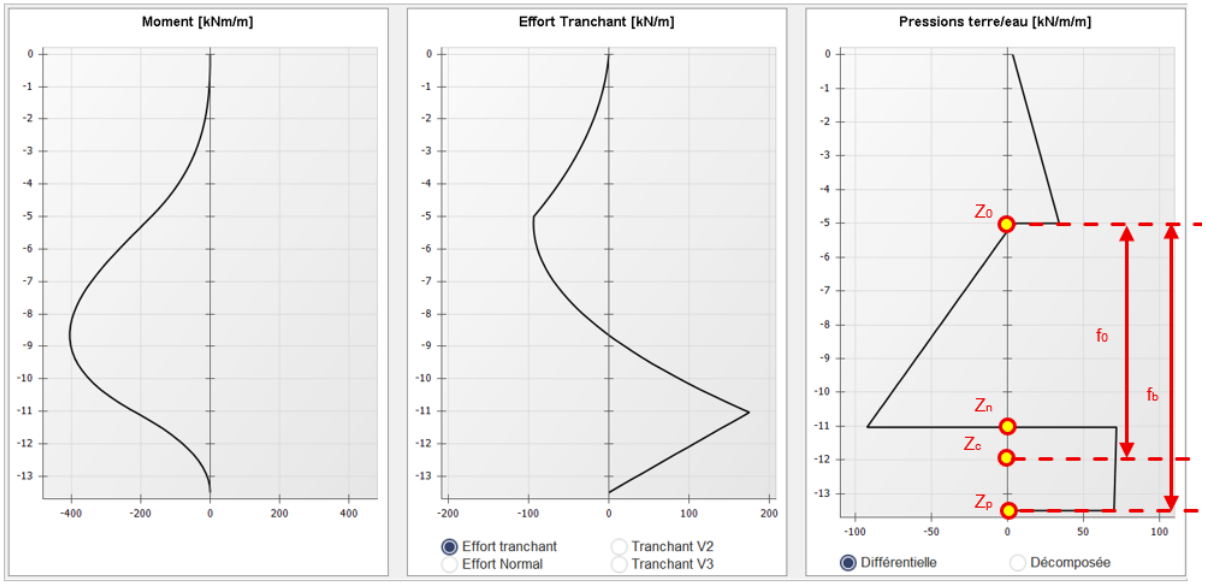
Retourner dans le menu « Données » puis dans l'onglet « Définition de l'écran » afin de rallonger la fiche. Modifier la cote de la base à -13,50 m au lieu de -13,00 m.



Relancer le calcul et cliquer sur l'onglet « Vérifications EC7 ».

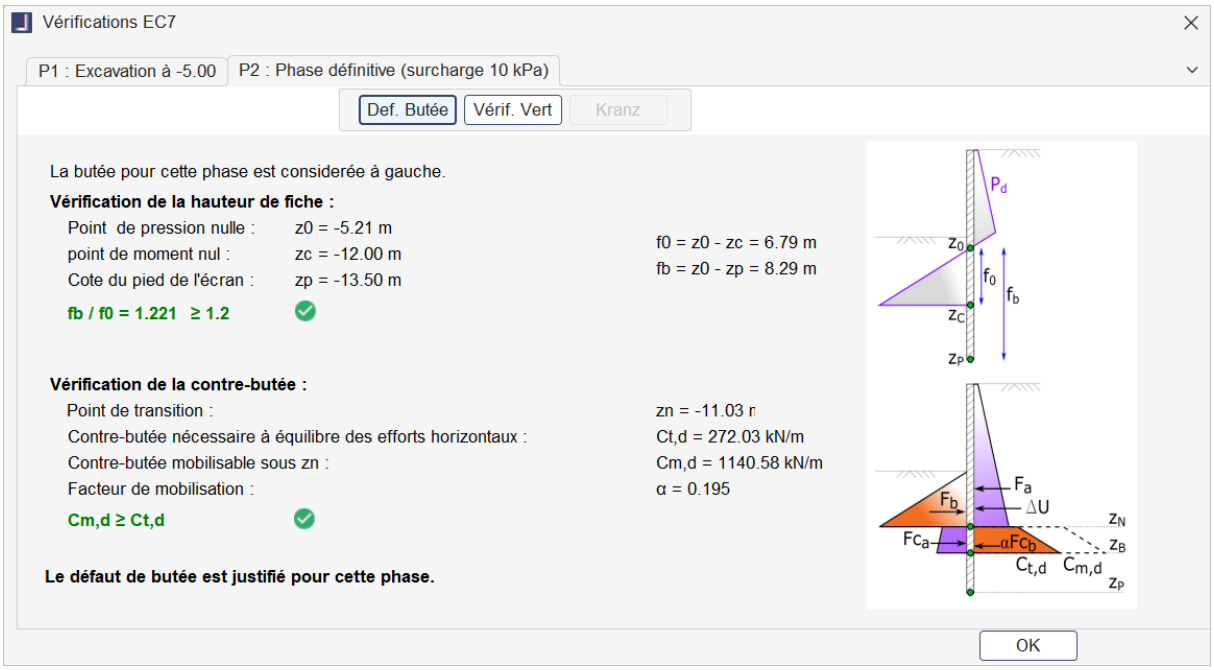
On s'intéresse toujours à la phase 2. La figure suivante rappelle la signification des paramètres intermédiaires utilisés dans le modèle MEL :

- Le point de pression différentielle nulle : z_0 = - 5,21 m
- Le point critique permettant l'équilibre des moments : z_c = -12,00 m
- La fiche disponible de l'écran à partir du point z_0 : $f_b = z_0 - z_{pied}$ = 8,29 m
- La fiche critique permettant l'équilibre des moments : $f_0 = z_0 – z_c$ = 6,79 m



La figure suivante présente le détail de la vérification du défaut de butée pour cette phase. Dans le cas présent, nous avons f_b = 1,22 f_0. La fiche de l'écran est donc optimale vis-à-vis du défaut de butée.

Cette vérification est complétée par celle de la contre-butée : il s'agit de vérifier que la contre-butée disponible (Cm,d) sous le point de transition z_n (= -11,03 m ici) est supérieure à celle nécessaire à l'équilibre des efforts (Ct,d). Cette condition équivaut celle d'un facteur de mobilisation α ≤ 1. Elle est satisfaite dans le cas de cet exemple.



D.3.3.3. Equilibre vertical

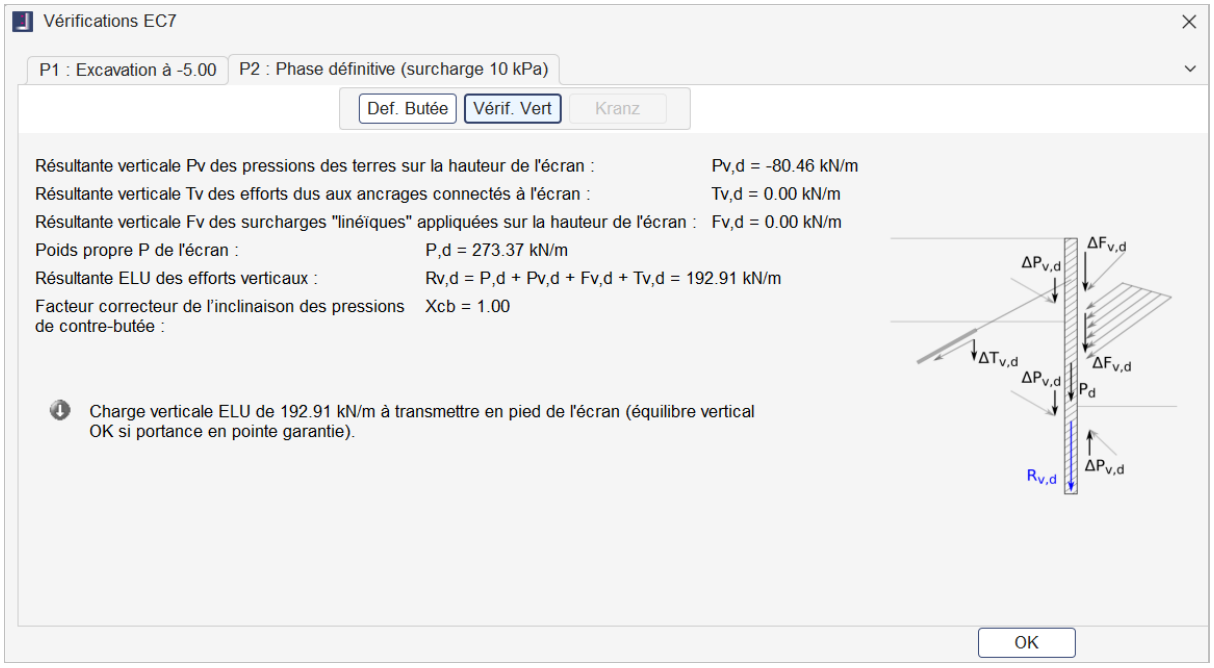
Toujours dans « vérifications ELU », cliquer à présent sur « Vérif. Vert » afin d'accéder à la vérification du bilan vertical des efforts. Cette vérification a pour double objectif :

- D'examiner la pertinence des hypothèses considérées pour les inclinaisons de poussée/butée ;
- D'examiner la portance de l'écran en tant qu'élément de fondation profonde : il appartient à l'utilisateur de vérifier que la contrainte transmise en pointe de l'écran est compatible avec la résistance du sol d'ancrage.

Comme le montre la figure suivante, cette vérification fait intervenir les paramètres intermédiaires suivants :

- Résultante verticale des pressions des terres : $P_{v,d}$ = 81 kN/m ;
- Résultantes verticales des efforts extérieurs $F_{v,d}$ et des ancrages $T_{v,d}$: nulles dans le présent exercice ;
- Poids propre de l'écran : $P_{,d}$ = 1,35 x 13,5 x 15 = 273 kN/m

L'ensemble de ces efforts est exprimé en valeurs de calcul. En particulier dans le cadre de l'approche 2, le poids propre de l'écran est multiplié par 1,35.



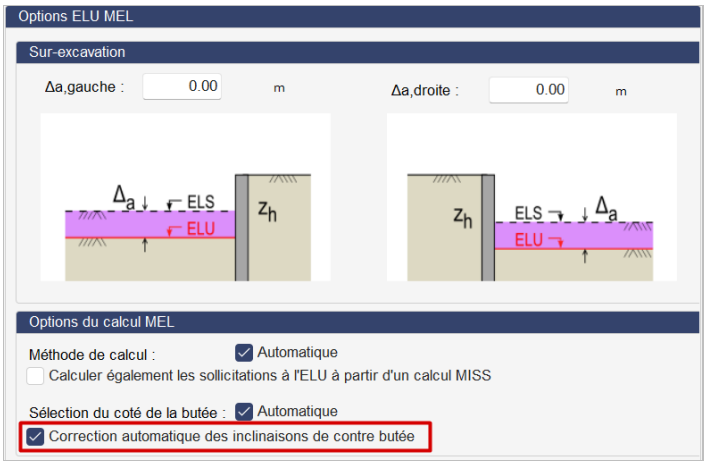
La fenêtre ci-dessus fait également apparaître un facteur Xcb dit « correcteur de l'inclinaison des pressions de contre-butée » dont la signification sera détaillée dans le chapitre suivant.

D.3.4 Etude paramétrique

L'objet de ce chapitre est d'illustrer le rôle joué par chacune des « options MEL » dans le cadre d'un écran autostable. **Les paragraphes qui suivent sont à traiter d'une manière indépendante**.

D.3.4.1. Correction des inclinaisons de poussée/butée

On s'intéresse dans ce paragraphe à l'option « correction automatique des inclinaisons de contre-butée » (accessible depuis l'action « options MEL » qui apparaît automatiquement pour chaque phase déclarée comme « en console »).



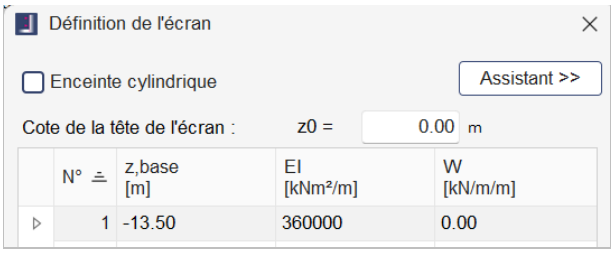
Cette option permet un réajustement automatique des inclinaisons de contre-butée si la vérification de l'équilibre vertical conduit à une résultante dirigée vers le haut. L'inclinaison de contre-butée prise en compte dans le calcul est la suivante :

$$(\delta/\varphi)_{\text{contre-butée}} = Xcb \times (\delta/\varphi)_{\text{butée}}$$

Le facteur Xcb a une valeur initiale de 1,00 puis est diminué (si nécessaire) progressivement jusqu'à l'obtention d'une résultante verticale vers le bas. Le processus s'arrête dans tous les cas quand Xcb atteint la valeur de -1,00. A noter que la modification de l'inclinaison de la contre-butée implique celle des coefficients de contre-butée $k_{p,cb}$ et $k_{pc,cb}$ qui interviennent dans le calcul la contre-butée disponible sous le point de transition z_n. Ces coefficients sont re-calculés automatiquement par le programme selon la méthode de calcul « de référence » désignée par l'utilisateur (par défaut « Kérisel et Absi »).

Dans l'exercice précédent, la vérification verticale a conduit à une résultante dirigée vers le bas avec Xcb = 1. Le fait d'obtenir Xcb = 1,00 signifie implicitement qu'aucune correction des inclinaisons de contre-butée n'a été jugée nécessaire par le programme.

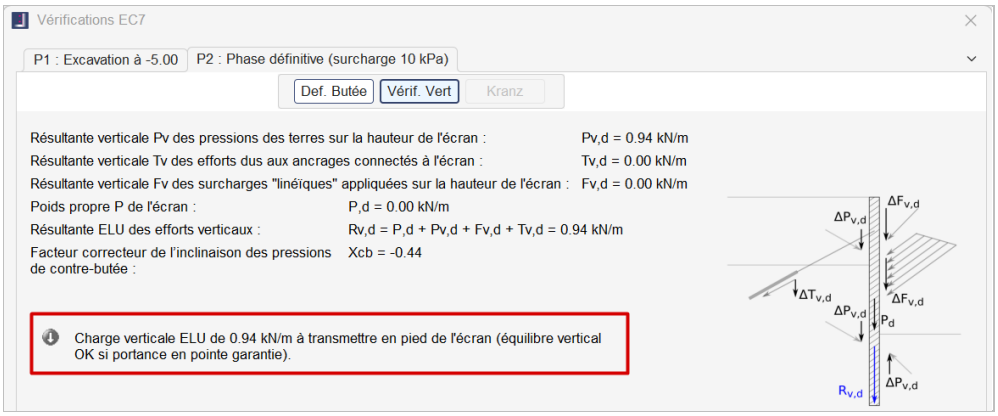
Afin d'illustrer l'effet de cette correction automatique, on se propose de relancer le calcul de l'écran en ignorant le poids propre de celui-ci. Aller pour cela dans le menu « Données » et cliquer sur « Données de l'écran » : définir ensuite W = 0.



Relancer le calcul et accéder directement à l'onglet « Vérifications EC7 » / « Vérif. Vert ».

Examinons le cas de la phase 2 par exemple. La valeur obtenue de Xcb est de -0,44 < 0.

Rappelons que, dans cet exercice, l'inclinaison des pressions limites de butée a été prise égale à -2/3φ (vers le haut).
L'obtention d'une valeur de Xcb négative signifie par conséquent que le processus de correction automatique a conduit à orienter les pressions de contre-butée vers le bas avec une inclinaison égale à -0,44 x -2/3φ = + 0,29φ pour les niveaux situés sous le point de transition $z < z_n$ = -11,04 m.



En accédant à la vérification du « Défaut de butée », on peut remarquer que la résultante de la contre-butée disponible Cm,d sous le point de transition a évolué (à la baisse) par rapport au résultat du calcul initial :

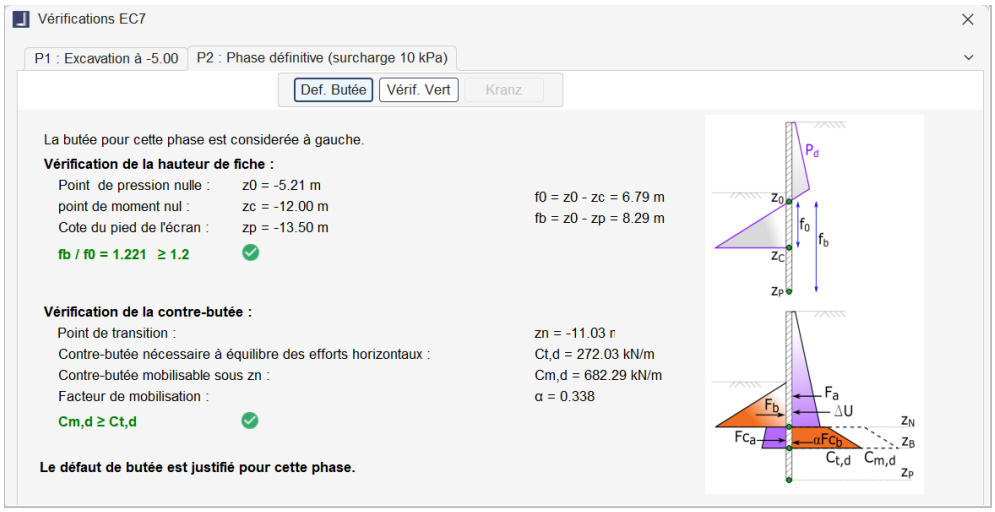
- Avec prise en compte du poids propre de l'écran :

  Xcb = +1,00 et $C_{m,d}$ = 1138 kN/m

- Sans prise en compte du poids propre de l'écran :

  Xcb = -0,44 et $C_{m,d}$ = 682 kN/m

La réduction de $C_{m,d}$ s'explique par la réévaluation par le programme des coefficients de contre-butée limite $k_{p,cb}$: $k_{p,cb}$ (δ/φ = +0,29) < $k_{p,cb}$ (δ/φ = -0,66).



D.3.4.2. Comparaison des modèles MEL « F » et « D »

On se propose dans ce paragraphe de comparer les schémas de calcul proposés par K-Réa pour mener un calcul à l'équilibre limite (MEL).

Attention : pour aborder cette étude paramétrique, il faut partir du modèle de base.

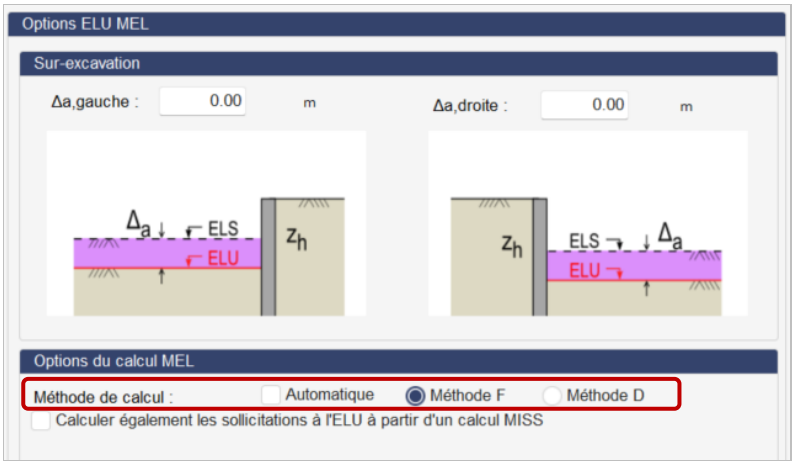
K-Réa propose en effet deux méthodes de calcul :

- Méthode F : celle-ci se base sur l'hypothèse d'une contre-butée assimilée à une pression additionnelle uniforme appliquée entre les cotes $z = z_c + 0{,}2f_0$ et $z = z_c - 0{,}2f_0$. La valeur de cette pression additionnelle est recherchée de manière à obtenir l'équilibre limite des efforts ;
- Méthode D (choix par défaut) : celle-ci se base sur l'hypothèse d'une contre-butée calculée comme une fraction α de la contre-butée mobilisable (ou limite) sous le point de transition z_n. Les valeurs de α et z_n sont recherchées simultanément de manière à obtenir l'équilibre (limite) des moments et des efforts sur la hauteur de l'écran (deux équations, deux inconnues).

La cote « effective » z_{eff} de la base de l'écran considérée dans le calcul diffère d'une méthode à l'autre :

- MEL – F : $z_{eff} = z_c – 0{,}2f_0$;
- MEL – D, trois options sont disponibles :
  - $z_{eff} = z_{pied}$ (option par défaut) ;
  - $z_{eff} = z_c – 0{,}2f_0$;
  - $z_{eff} = z_{utilisateur}$ (imposée par l'utilisateur).

Aller dans « Options MEL » de la phase 2 et décocher la case « Automatique » de la « Méthode de calcul », puis sélectionner « Méthode F ».



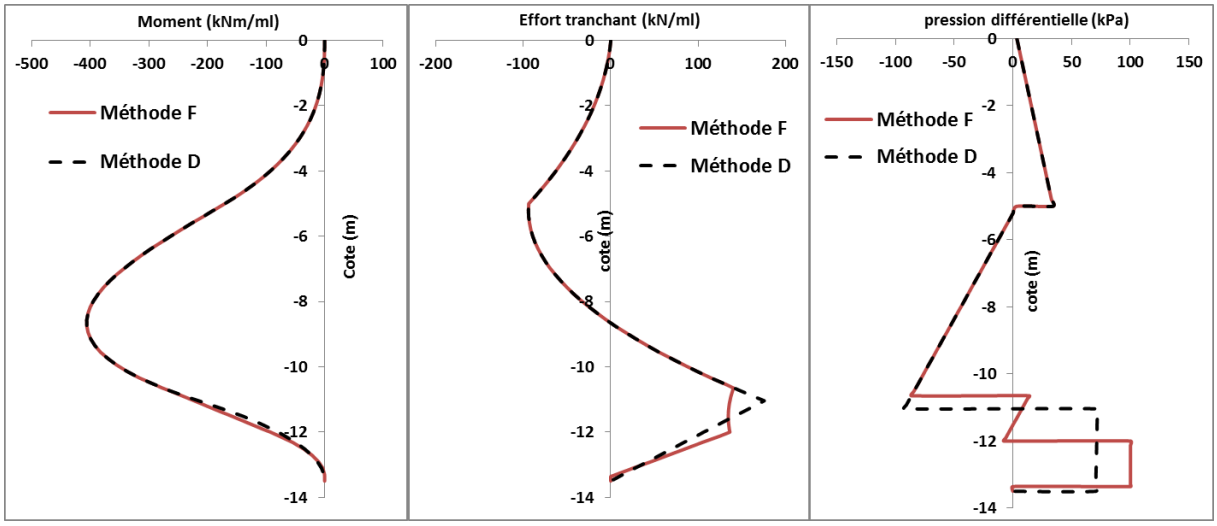
Lancer le calcul et comparer les résultats obtenus (diagrammes des moments, détail des vérifications ELU) à ceux d'un calcul MEL-D. Le tableau suivant récapitule les éléments de cette comparaison.

	M_{max} (kNm/m)	V_{max} (kN/m)	z_c (m)	z_n (m)	f_0 (m)	$C_{m,d}$ (kN/m)	$C_{t,d}$ (kN/m)
Méthode F	406	140	-12,00	-	6,79	645	272
Méthode D	406	176	-12,00	-11,04	6,79	1138	272

Les deux méthodes conduisent strictement au même moment maximal, au même point critique et par conséquent à la même fiche critique f_0. La résultante de la butée mobilisée (celle nécessaire à l'équilibre des efforts) est identique par les deux approches.

Par contre, la hauteur de calcul de la contre-butée diffère par construction entre les deux méthodes, d'où une différence dans la valeur de la butée mobilisable $C_{m,d}$. On observe également un écart au niveau de l'effort tranchant qui s'explique par l'approximation faite par la méthode F sur la distribution « uniforme » de la pression additionnelle de contre-butée.

Les graphiques ci-dessous comparent les diagrammes des moments, efforts tranchants et pressions différentielles issus des deux méthodes. Ils corroborent les constats du tableau précédent.



D.3.4.3. Influence de la sur-excavation

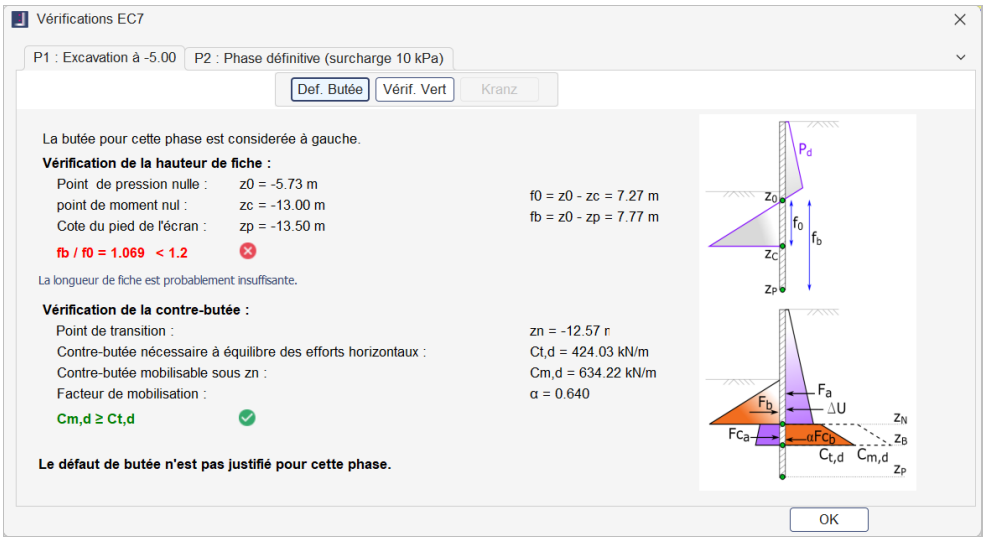
On s'intéresse dans ce paragraphe à l'option « sur-excavation » dans K-Réa. La prise en compte d'une sur-excavation dans les justifications ELU est réglementairement exigée en l'absence d'un contrôle strict du fond de fouille. Dans ce cas, celle-ci est prise égale à :

$$\Delta a_{gauche} = \min (50 \text{ cm} ; 10\% \ H_{soutenue}) = 50 \text{ cm}$$

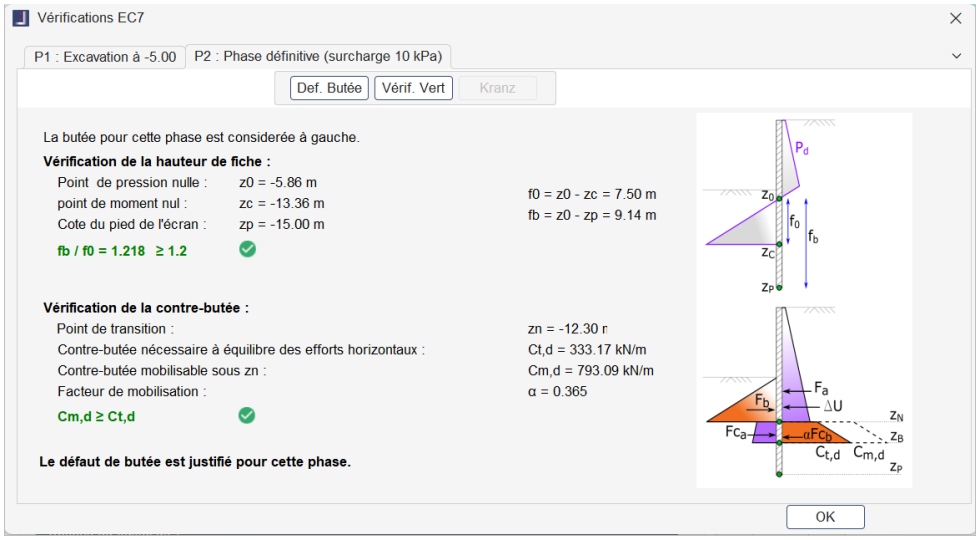
Attention : pour aborder cette étude paramétrique, il faut partir du modèle de base.

On propose donc de relancer le calcul en considérant une sur-excavation de 50 cm à gauche en phases 1 et 2.

Le résultat des vérifications EC7 indique que la fiche de l'écran n'est plus suffisante et qu'un allongement de l'écran est donc nécessaire dans ces conditions.



La recherche de la fiche optimale montre que la vérification du défaut de butée tenant compte d'une sur-excavation de 0,5 m nécessite de rallonger l'écran de 1,50 m par rapport à la longueur initialement validée en l'absence de sur-excavation. Le résultat obtenu avec une base de l'écran à -15,00 est présenté ci-dessous.



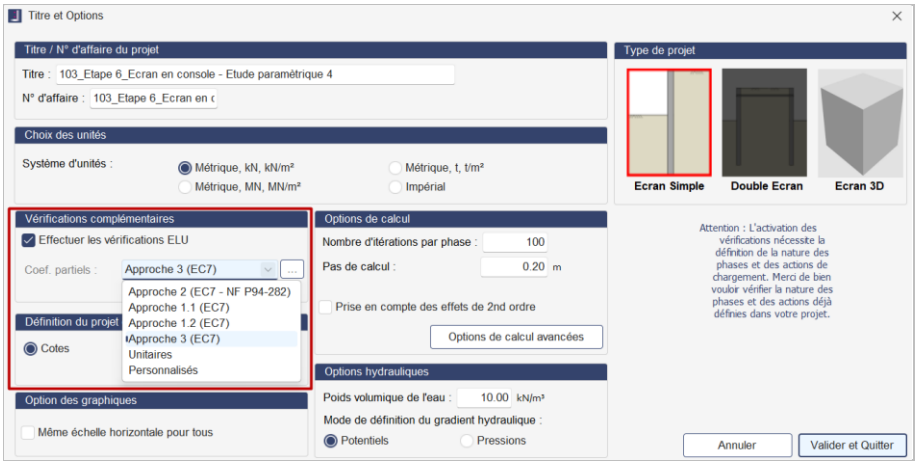
D.3.4.4. Comparaison des approches de calcul 2 et 3

Les résultats ELU précédents ont été obtenus en appliquant l'approche 2 imposée par la norme française pour les vérifications ELU – GEO et ELU – STR.

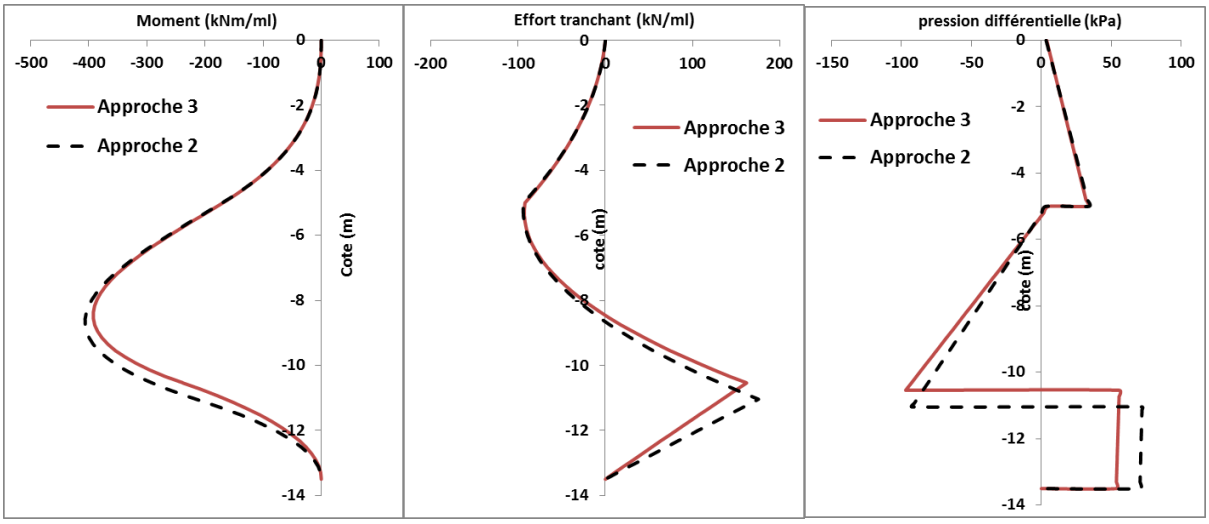
Nous proposons de comparer les résultats précédents à ceux issus de l'application de l'approche 3 de l'Eurocode 7 (appliquée par d'autres pays européens). Il suffit pour cela d'aller dans « Titres et Options » et de sélectionner l'approche 3 dans la liste déroulante « coef. partiels »

Attention : pour aborder cet étude paramétrique, il faut partir du modèle de base.

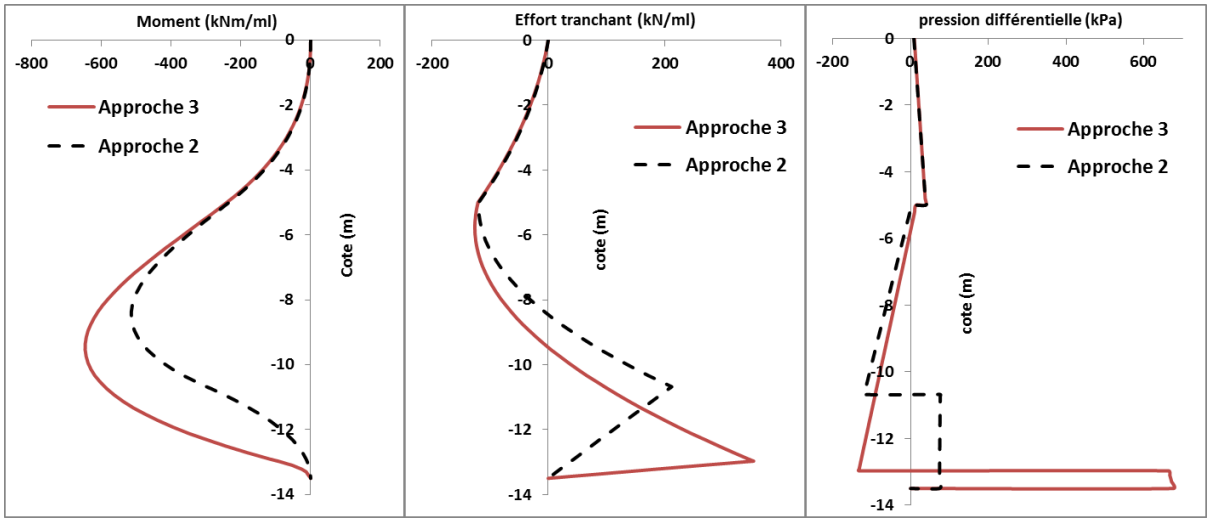
Relancer ensuite les calculs et comparer les résultats avec ceux obtenus précédemment.



Les graphiques ci-dessous illustrent cette comparaison pour la phase 2 où les deux approches semblent conduire à des résultats comparables s'agissant d'une phase « durable ».



En revanche, l'approche 3 ne permet pas de distinguer les phases transitoires de celles durables (l'approche 2 considère une sécurité plus faible sur la butée dans le cas d'une phase transitoire). La comparaison avec l'approche 2 en phase 1 (transitoire) montre donc des résultats divergents. L'approche 3 conduit à des résultats plus défavorables.

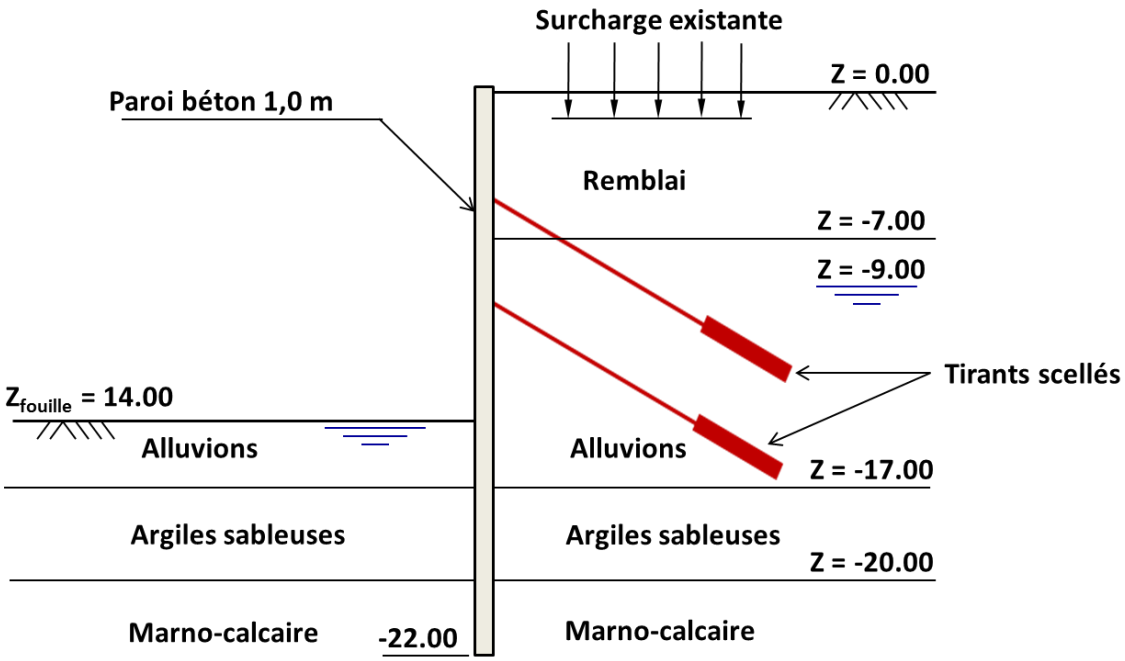


D.4. Tutoriel 4 : Fouille tirantée et stabilité du massif d'ancrage

Cet exemple présente le calcul d'une paroi moulée de 1,0 m d'épaisseur, descendue à 22 m de profondeur, et ancrée par deux lits de tirants scellés actifs inclinés de 30° par rapport à l'horizontale.

La longueur de scellement des tirants est fixée à 10 m. Le maillage des tirants inférieurs est environ 1,50 fois plus dense que celui des tirants supérieurs. En première approche, on suppose une longueur libre de 7 m pour l'ensemble des tirants, ce qui correspond à une longueur « utile » de 7 + 10/2 = 12 m.

La figure ci-dessous schématise la géométrie du problème étudié.



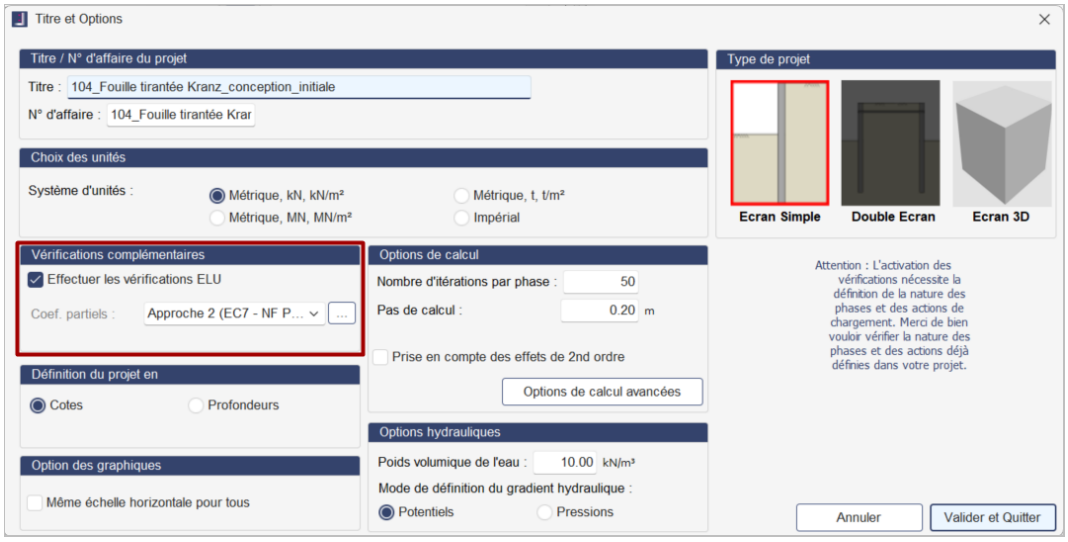
Cet exemple vise essentiellement à rendre compte des fonctionnalités de K-Réa liées aux vérifications ELU selon l'EC7, en particulier vis-à-vis de la stabilité du massif d'ancrage dans le cas d'un écran ancré par un ou plusieurs lits de tirants scellés.

D.4.1 Saisie des données

Pour démarrer K-Réa :

- Double-cliquer sur l'icône **K-Réa**.
- Choisir le mode de protection adéquat, conserver la langue par défaut (**Français**) et cliquer sur **OK.**
- Choisir **Nouveau projet** pour accéder au formulaire **Titre et Options**.

D.4.1.1. Titre et options



- Dans le cadre **Type de projet** (à droite), sélectionner "Ecran simple".
- Dans le cadre de **Titre / N° d'affaire du projet**, cliquer dans la ligne blanche 'Titre' et saisir le titre de votre choix.
- Cliquer dans la ligne blanche 'N° d'affaires' pour rentrer le numéro de votre choix.
- Dans le cadre **Choix des unités** choisir le système d'unités de votre projet, en cochant 'Métrique, kN, kN/m²'.
- Choisir **Définition du projet en** Cotes, ce qui permet d'orienter l'axe vertical vers **le haut.**
- **Vérifications complémentaires** : cocher la case 'Effectuer les vérifications ELU' afin d'activer le calcul aux états limites ultimes pour cet exemple.
- Dans le cadre **Option des graphiques**, conserver la case 'Même échelle horizontale pour tous' cochée.
- Dans le cadre **Options de calcul**, conserver les réglages par défaut : 50 itérations par phase de calcul et un pas de calcul de 0,2 m pour l'écran.
- Dans le cadre **Options hydrauliques** laisser le poids volumique de l'eau égale à 10,00 kN/m³. Choisir Potentiels comme mode de définition du gradient hydraulique
- Cliquer sur le bouton **Valider et quitter**.
- K-Réa demande alors d'enregistrer le nouveau projet : définir le nom et le répertoire souhaités.

D.4.1.2. Définition des couches de sol

Les caractéristiques générales des 4 couches intéressant l'exercice sont récapitulées dans le tableau suivant.

Couche	γ (kN/m³)	γ' (kN/m³)	φ (°)	c (kPa)	dc (kN/m²/m)	δ_a/φ (-)	δ_p/φ (-)	E_M (MPa)	α (-)
Remblai	18	10	30	0	0	0,66	-0,66	10	0,50
Alluvions	20	10	35	0	0	0,66	-0,66	20	0,33
Argiles sableuses	20	10	28	0	0	0,66	-0,66	8	0,67
Marno-calcaire	22	12	30	40	0	0,66	-0,66	40	0,50

Utiliser ensuite les assistants de K-Réa pour calculer les paramètres permettant de constituer la loi de comportement de chaque couche.

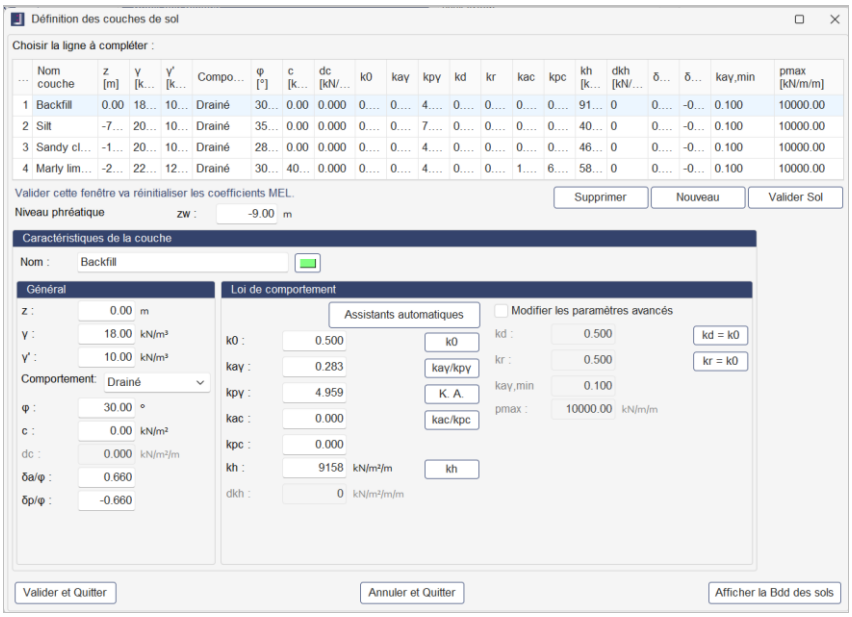
Le coefficient de réaction k_h est évalué à l'aide du modèle de Schmitt en considérant un produit d'inertie EI = 1 667 MNm²/m (calculé pour une paroi continue de 1 m d'épaisseur avec E = 20 GPa).

Les paramètres à obtenir à l'aide des assistants sont les suivants.

Couche	k_0 (-)	$k_{a\gamma}$ (-)	$k_{p\gamma}$ (-)	k_{ac} (-)	k_{pc} (-)	k_h (kN/m³)
Remblai	0,500	0,283	4,959	0	0	9 158
Alluvions	0,426	0,227	7,301	0	0	40 158
Argiles sableuses	0,531	0,309	4,398	0	0	4 604
Marno-calcaire	0,500	0,283	4,959	1,237	6,271	58 148

Les autres paramètres sont conservés à leurs valeurs par défaut. Laisser pour cela la case **Modifier les paramètres avancés** décochée.

L'écran suivant illustre celui de K-Réa à la suite de ces opérations :



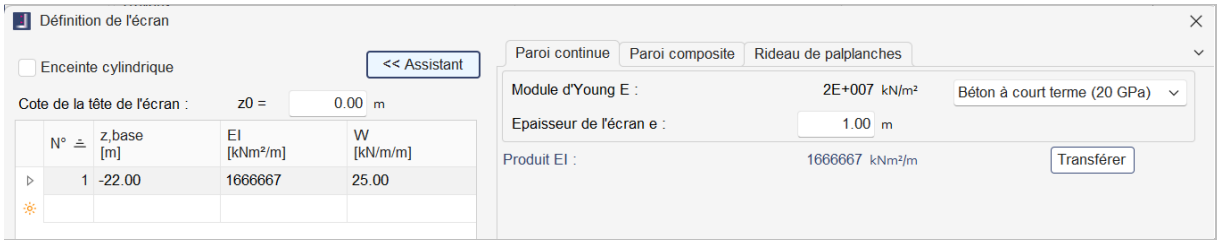
Cliquer sur **Valider et quitter**.

D.4.1.3. Définition de l'écran

Après avoir validé les caractéristiques des couches, il convient de définir celles de l'écran :

- Cote de la tête : z_0 = +0,00 m
- Cote de la base : z_{base} = -22,0 m
- Produit d'inertie : EI = 1 666 667 kNm²/m
- Poids surfacique : W = 25 kN/m/m

L'écran suivant illustre les manipulations précédentes :



D.4.2 Définition du phasage

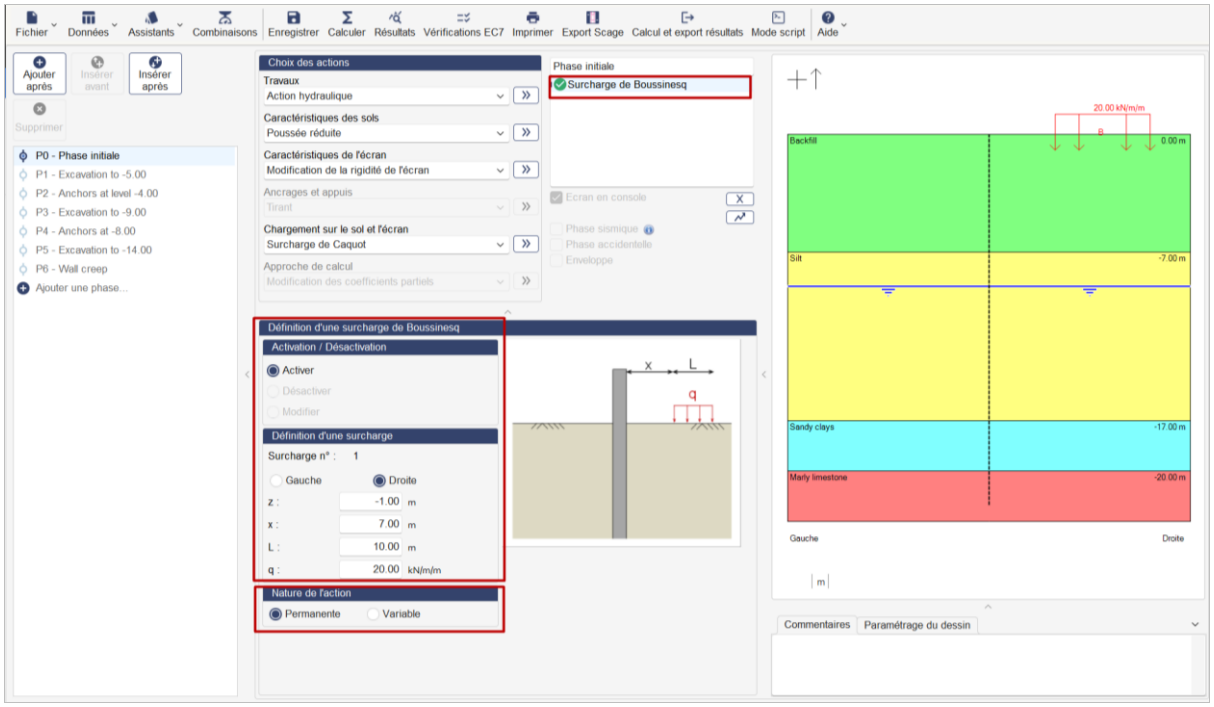
Il convient à présent de définir les actions à considérer dans chaque phase de construction. Ces actions sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

PHASE	ACTIONS
Initiale	Surcharge existante de Boussinesq de 20 kN/m/m
Phase 1 - Transitoire	Excavation à la cote -5,00 m
Phase 2 - Transitoire	Premier lit de tirants actifs à -4,00 m
Phase 3 - Transitoire	Excavation à la cote -9,00 m
Phase 4 - Transitoire	Deuxième lit de tirants actifs à -8,00 m
Phase 5 - Durable	Excavation à la cote -14,00 m
Phase 6 - Durable	Fluage de la paroi (E = 10 GPa)

D.4.2.1. Phase initiale

On définit dans cette phase une surcharge localisée initiale représentative d'un bâtiment existant. Définir ce qui suit :

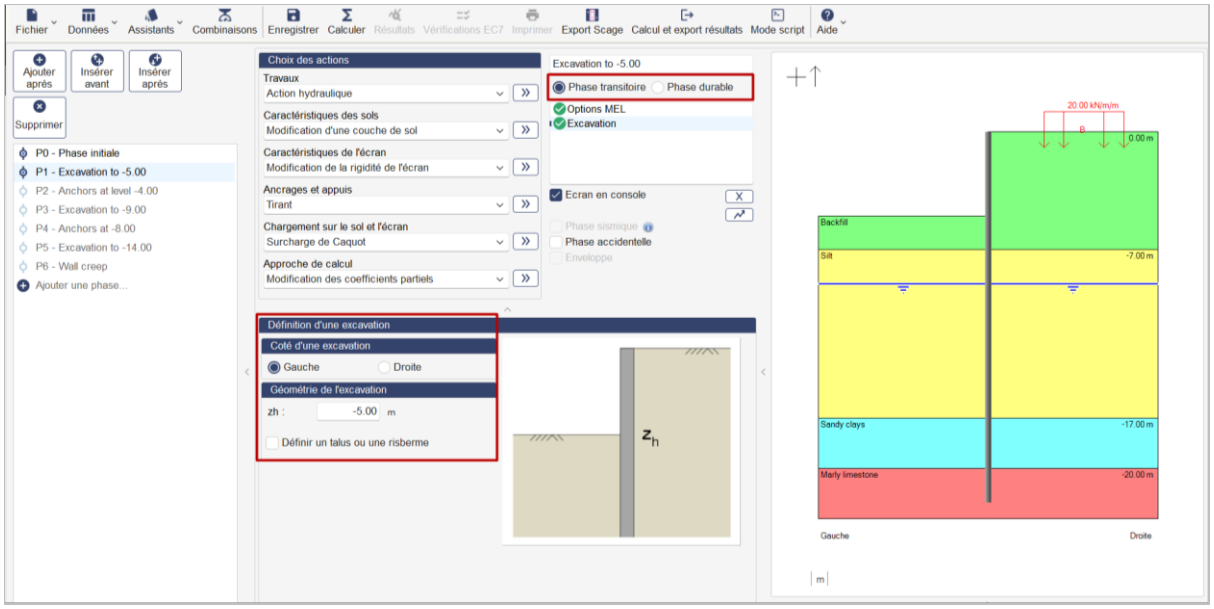
- Action Surcharge de Boussinesq avec
  - z = -1,00 x = 7,00 m
  - L = 10 m q = 20 kN/m/m
  - Nature permanente



D.4.2.2. Phase 1 : Excavation à la cote -5,00

Cette phase est à définir comme « phase transitoire ». Une seule action à saisir :

- Action « Excavation » à gauche avec z_h = -5,00 ;

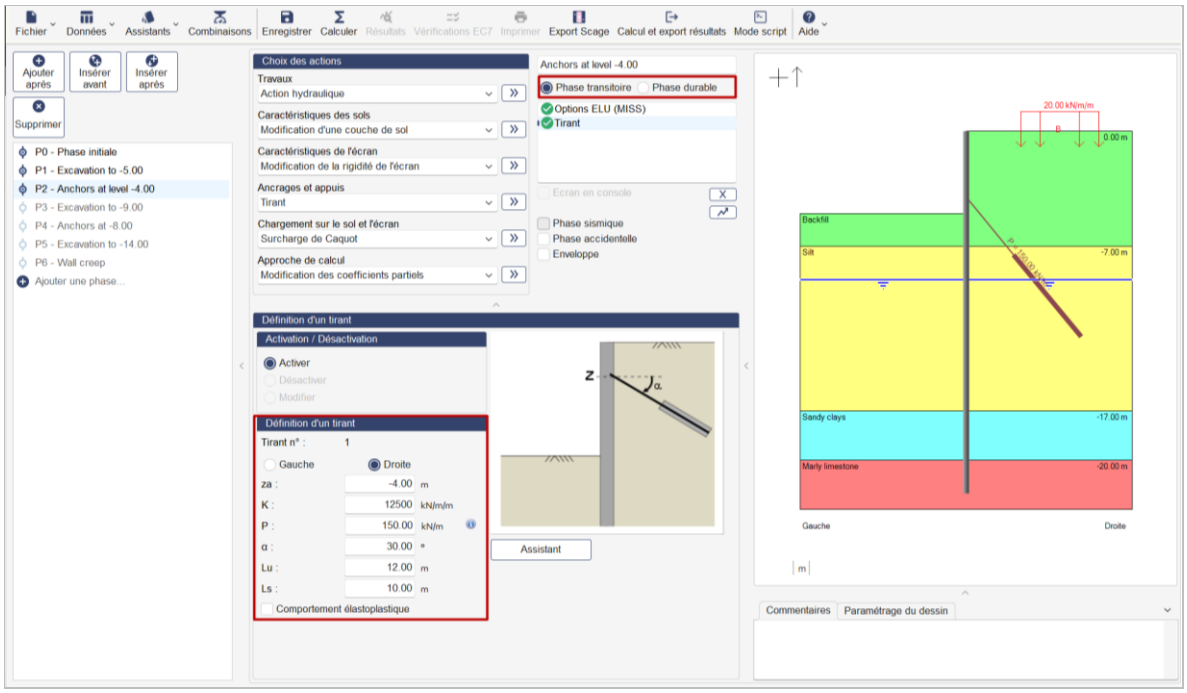


La case Ecran en console est automatiquement cochée : l'équilibre ELU de l'écran sera donc vérifié par un modèle « MEL » dans cette phase.

D.4.2.3. Phase 2 : Tirants à la cote -4,00

Cette phase est à définir comme « phase transitoire ». Une seule action à saisir :

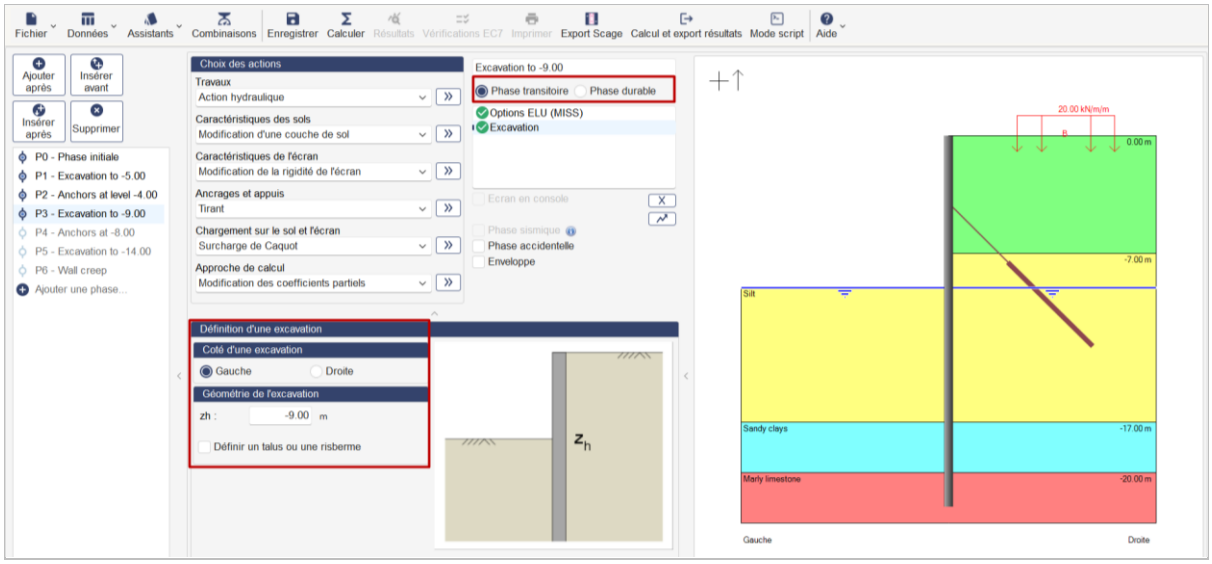
- Action « Tirant » à droite à za = -4,00 avec :
  - K = 12 500 kN/m/m P = 150 kN/m α = 30° Lu =12 m Ls = 10 m



D.4.2.4. Phase 3 : Excavation à la cote -9,00

Cette phase est à définir comme « phase transitoire ». Une seule action à saisir :

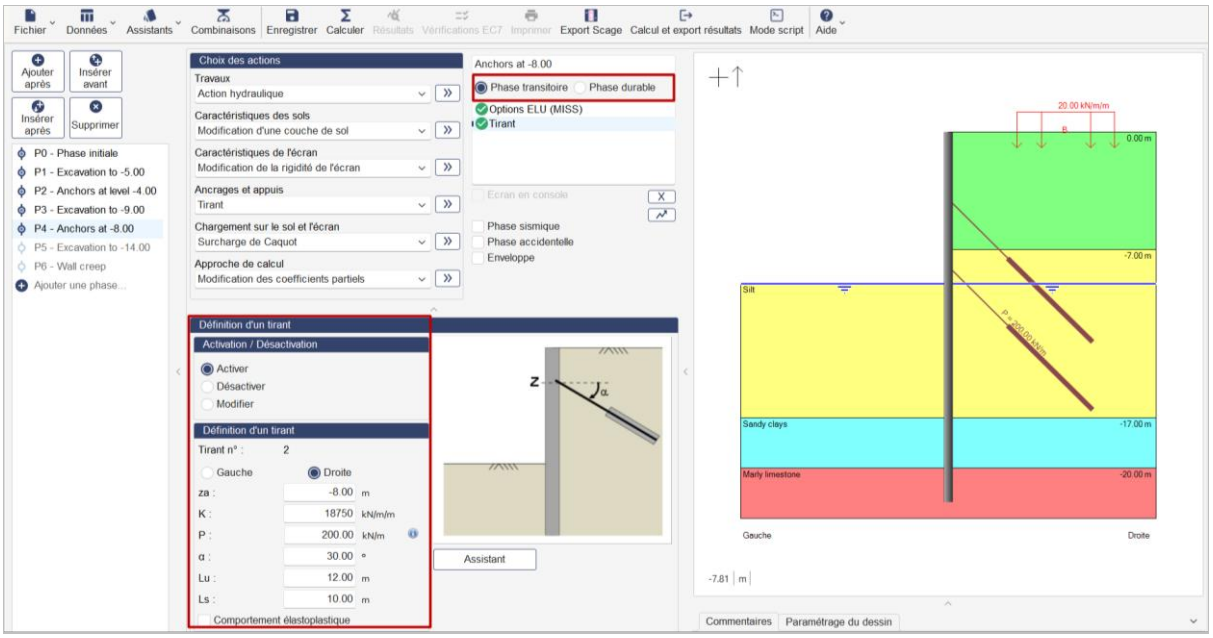
- Action « Excavation » à gauche avec z_h = -9,00



D.4.2.5. Phase 4 : Tirants à la cote -8,00

Cette phase est à définir comme « phase transitoire ». Une seule action à saisir :

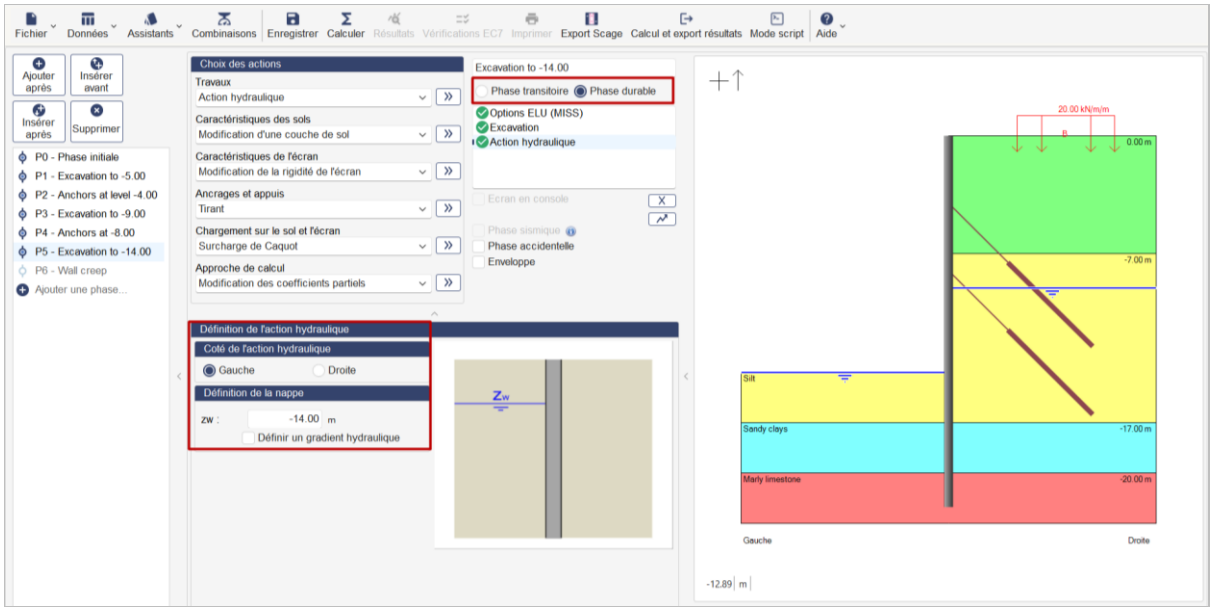
- Action « Tirant » à droite à za = -8,00 avec :
  - K = 18 750 kN/m/m P = 200 kN/m α = 30° Lu =12 m Ls = 10 m



D.4.2.6. Phase 5 : Excavation à la cote -14,00

Cette phase est à définir comme « phase durable ». Deux actions sont à saisir :

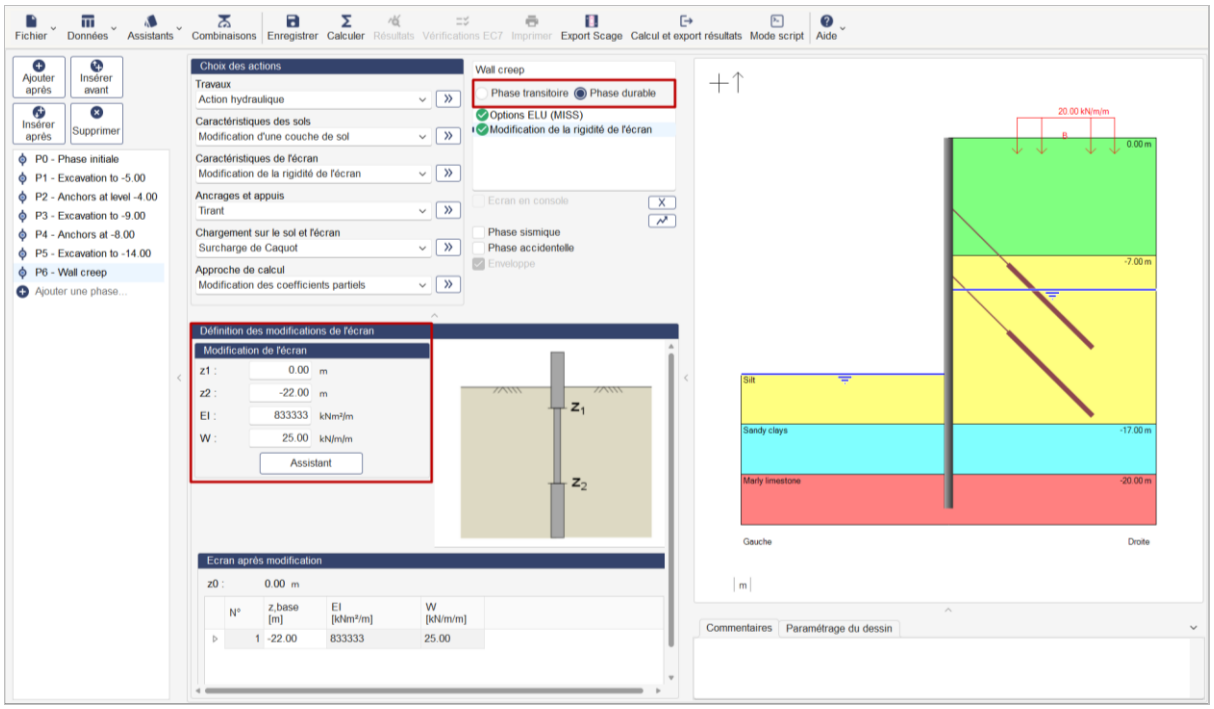
- Action « Excavation » avec z_h = -14,00 à gauche ;
- Action « Hydraulique » avec z_w = -14,00 à gauche (sans gradient).



D.4.2.7. Phase 6 : Fluage de la paroi

Cette phase également définie comme « phase durable », vise à simuler le fluage de la paroi. Une seule action est donc à définir :

- Action « Modification de la rigidité de l'écran » avec :
  - z1 = 0,00 z2 = -22,00 EI = 833 333 kNm²/m W = 25 kN/m/m



D.4.3 Calcul et résultats

D.4.3.1. Aperçu général

Pour chaque phase, K-Réa propose deux types de résultats :

- Résultats ELS : déplacements, sollicitations ELS et réactions d'ancrage à l'ELS ;
- Résultats ELU : avec ou sans déplacements (si calcul MEL), les sollicitations ELU sont exprimées en valeurs de calcul et en valeurs caractéristiques (si calcul MISS).

Les figures suivantes présentent la synthèse des résultats obtenus à l'ELS et à l'ELU.

Le moment ELU maximal dans la paroi atteint Md = 1 270 kNm/m en phase 5. L'effort normal maximal atteint quant à lui Nd =1209 kN/m dans cette même phase. Le déplacement maximal (à l'ELS) atteint 2,4 cm à -12,80 NGF suite au fluage de la paroi (moins de 2 cm sans prise en compte du fluage). Le déplacement en tête reste inférieur au centimètre.

L'effort d'ancrage atteint 574 kN/m pour le lit inférieur et 279 kN/m pour le lit supérieur. Ces valeurs, exprimées par ml, doivent être ensuite multipliées par l'espacement entre les tirants pour obtenir l'effort par élément d'ancrage.

La synthèse des résultats ELU indique par ailleurs que la vérification du défaut de butée est justifiée pour l'ensemble des phases (fiche suffisante) et que le bilan vertical en pied de l'écran conduit à une résultante vers le bas.

Il est à noter en revanche que la stabilité du massif d'ancrage (Kranz) n'est pas justifiée pour les phases 5 et 6, ce qui signifie que la longueur libre des tirants est insuffisante.

Résultats

Données | Synthèse des résultats | Enveloppe phases P1 à P6 | P1 : Excavation to -5.00 | P2 : Anchors at level -4.00 | P3 :

Type
- ELS et ELU
- (●) ELS
- ELU

N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées	F,k tirant n°1 [kN/m]	F,k tirant n°2 [kN/m]
P1	-8.78	-8.78	-287.54	538.25	-72.01	9.040	-	-
P2	-7.05	-7.05	-200.71	583.88	-96.73	9.262	150.00	-
P3	-7.50	-7.50	-200.38	635.66	119.94	5.237	167.84	-
P4	-7.37	-7.37	172.71	687.16	114.87	5.441	161.85	200.00
P5	-3.87	-18.87	936.42	894.65	314.81	2.133	206.49	394.68
P6	-3.05	-24.52	766.33	891.25	312.19	2.088	201.93	424.67
Extrema	-8.78	-24.52	936.42	894.65	314.81	2.088	206.49	424.67

Résultats

Données | Synthèse des résultats | Enveloppe phases P1 à P6 | P1 : Excavation to -5.00 | P2 : Anchors at level -4.00 | P3 :

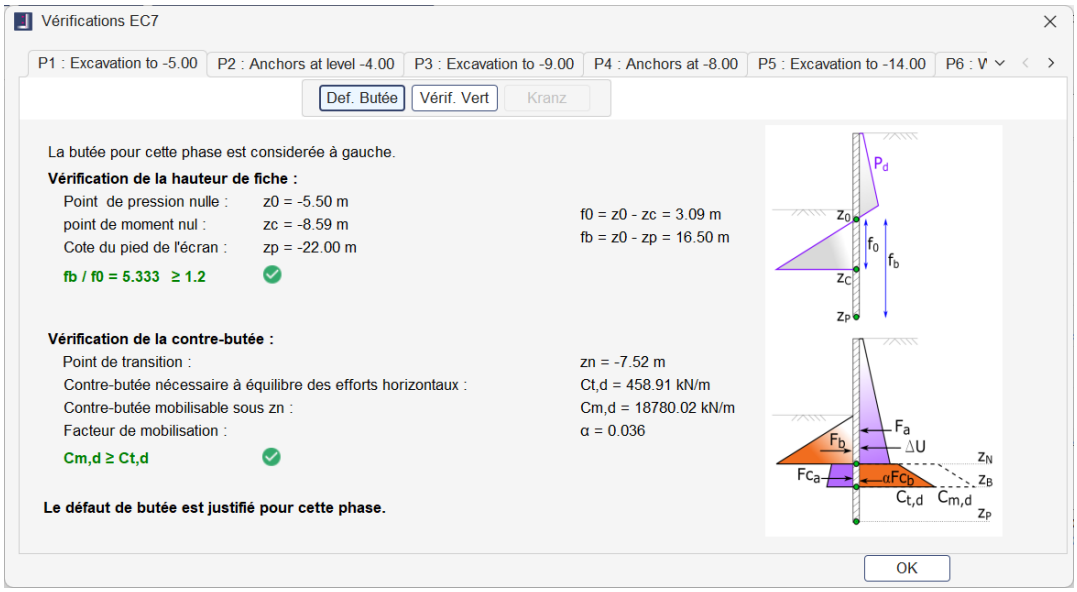
Type
- ELS et ELU
- ELS
- (●) ELU

N° PHASE	Type	M,d max écran [kNm/m]	N,d max écran [kN/m]	V,d maxi écran [kN/m]	F,d tirant n°1 [kN/m]	F,d tirant n°2 [kN/m]	Vérif. Def. Butée	Bilan Vert	Vérif. Kranz
P1	MEL	-309.16	648.90	101.96	-	-	OK	648.90	OK
P2	MISS	-270.95	788.24	-130.59	202.50	-	OK	788.24	OK
P3	MISS	-270.52	858.14	161.92	226.59	-	OK	858.14	OK
P4	MISS	233.16	927.66	155.08	218.50	270.00	OK	927.66	OK
P5	MISS	1264.17	1207.77	424.99	278.76	532.82	OK	1105.54	Non OK
P6	MISS	1034.54	1203.18	421.46	272.60	573.31	OK	1099.29	Non OK
Extrema		1264.17	1207.77	424.99	278.76	573.31			

D.4.3.2. Défaut de butée

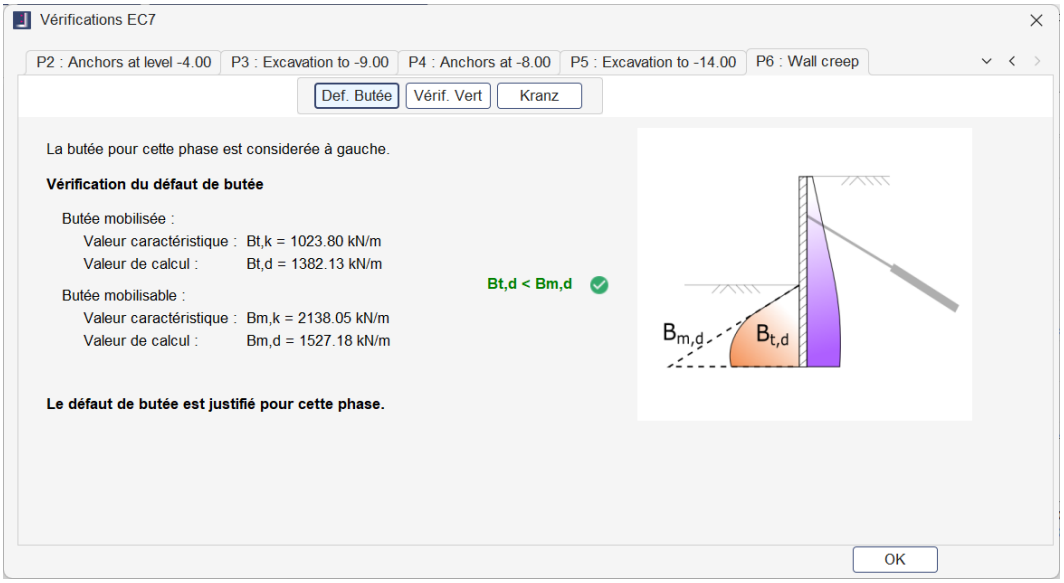
A partir de l'écran des résultats ELU, pour chacune des phases, 3 boutons permettent d'accéder aux résultats détaillés des 3 types de vérification ELU. Intéressons-nous d'abord au défaut de butée.

Pour la phase 1, la vérification du défaut de butée a été menée selon le modèle MEL dont les principaux paramètres sont résumés dans la fenêtre de résultats (voir le tutoriel « Fouille soutenue par écran autostable » pour plus de précisions sur ce modèle).



Pour les phases suivantes (2 à 6), la paroi est considérée comme "ancrée" et par conséquent la vérification du défaut de butée est basée sur le calcul MISS. Elle consiste à vérifier que la butée mobilisable (ou limite) est supérieure avec une sécurité suffisante à la butée mobilisée. A titre d'exemple, pour la phase 6 :

- Valeur de calcul de la butée mobilisable : $B_{m,d}$ = 2 138 / 1,40 = 1 527 kN/m.
- Valeur de calcul de la butée mobilisée : $B_{t,d}$ = 1 024 x 1,35 = 1 383 kN/m < $B_{m,d}$.



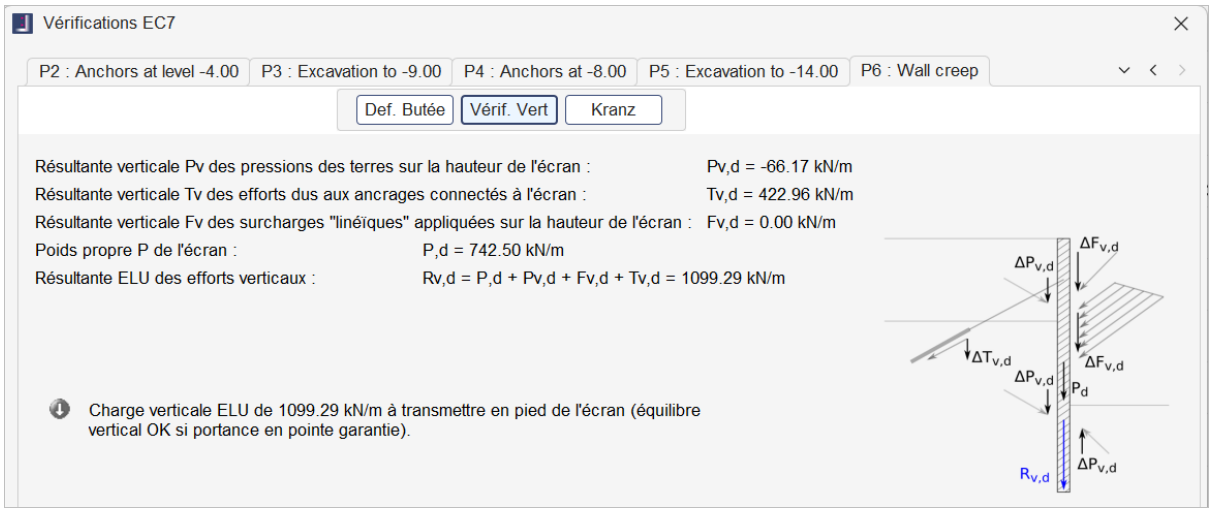
L'application du facteur "1,40" sur la butée mobilisable s'explique par le fait que la phase 6 (comme la phase 5) est considérée comme "durable".

D.4.4 Equilibre vertical

Le deuxième bouton "Vérif. Vert" permet d'accéder au bilan vertical des efforts. La figure ci-dessous présente le résultat obtenu pour la phase 6.

Le bilan des efforts verticaux prend en compte l'intégration, sur toute la hauteur de l'écran, des termes suivants :

- La composante verticale de la pression des terres mobilisée. Elle est calculée à partir de l'équilibre horizontal de l'écran (calcul MISS) ;
- La composante verticale des efforts dans les tirants ;
- Les efforts extérieurs éventuels s'appliquant directement sur la paroi) ;
- Le poids propre de la paroi.



Ici, pour la phase 6, la résultante verticale des efforts est évaluée (à l'ELU) à environ 1 100 kN/m, ce qui correspond à une contrainte en pointe de 1 100 / 1,0 = 1,1 MPa, ce qui est acceptable compte tenu de la nature du terrain porteur (Marnes avec pl > 3 MPa).

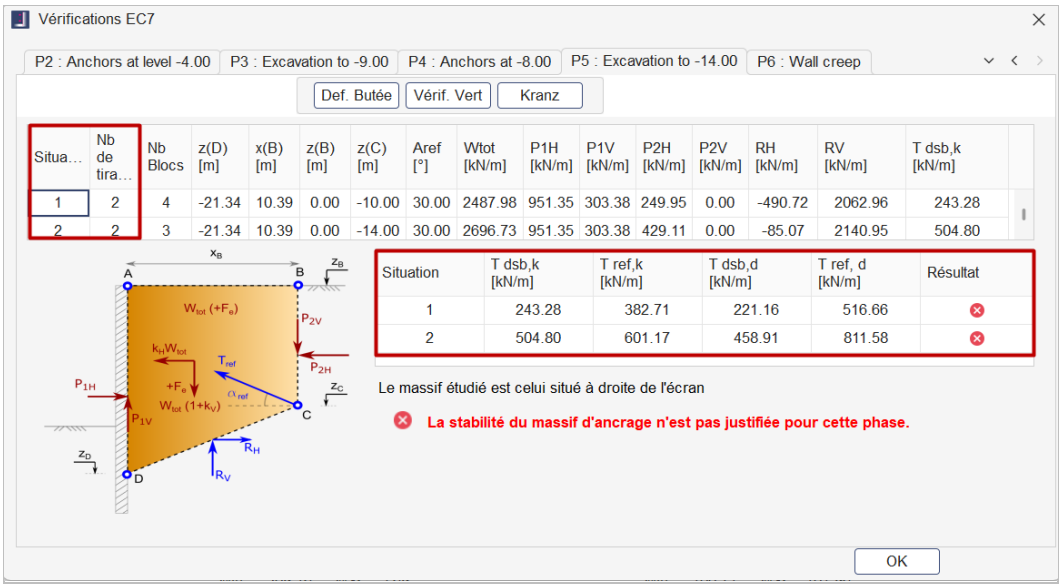
Notons que pour le cas d'une paroi ancrée (phases 2 à 6), l'évaluation de la composante verticale des pressions des terres le long de la paroi est basée sur une approche au "prorata" : pour une composante horizontale de la pression des terres qui est "intermédiaire" (entre poussée limite et butée limite), la composante verticale correspondante est calculée au prorata du taux de mobilisation horizontal, en considérant que la composante verticale est nulle pour un déplacement nul (point de référence). Ceci est détaillé et illustré dans la partie C du manuel. Il est important de rappeler que cette approche n'est valable que dans le cas d'un terrain initialement horizontal.

D.4.5 Stabilité du massif d'ancrage (Kranz)

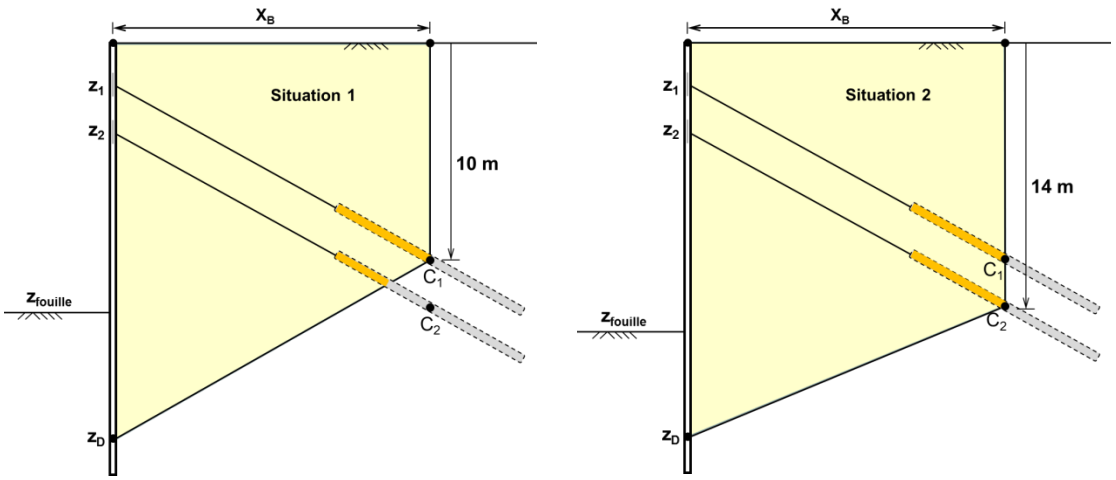
Pour les phases 2 à 6, la présence de tirants déclenche l'exécution d'une vérification supplémentaire, qui est la vérification de la stabilité du massif d'ancrage.

Cette vérification est réalisée à l'aide du modèle "Kranz" : pour chaque phase, on considère le cas échéant plusieurs situations (qui correspondent au massif d'ancrage associé à chaque tirant actif dans une phase donnée). Ensuite, pour chaque situation, le calcul prend en compte un ou plusieurs tirants, selon que leur zone de scellement se trouve partiellement ou entièrement en dehors du massif d'ancrage considéré.

Considérons par exemple le cas de la phase 5 pour laquelle deux situations sont examinées.



- **Situation 1** correspondant au massif d'ancrage du tirant supérieur (figure ci-dessous – gauche). L'effort d'ancrage de référence considéré dans cette situation est égal à celui du tirant 1 + une partie de l'effort du tirant 2 :
    - Tirant 1 :
        - La valeur de calcul de son effort est $T_{1,d}$ = 279 kN/m ;
        - Point d'ancrage effectif (milieu du scellement) situé à l'intérieur du massif d'ancrage => effort pris en compte à 100 % ;
    - Tirant 2 :
        - La valeur de calcul de son effort est $T_{2,d}$ = 533 kN/m ;
        - Point d'ancrage effectif situé à l'extérieur du massif mais une partie du scellement est à l'intérieur du massif (2,24 m environ) => effort pris en compte au prorata de 2,24 m / 5,00 m, soit 45%.
    - Bilan : la valeur de calcul de l'effort d'ancrage de référence pour cette situation est donc $T_{réf,d}$ = (1,00 x $T_{1,d}$ + 0,45 x $T_{2,d}$) = 517 kN/m.



- **Situation 2** correspond au massif d'ancrage du tirant inférieur (figure ci-dessus – droite). Les points d'ancrage des deux tirants sont situés à l'intérieur du massif. Les efforts des deux tirants sont alors entièrement pris en compte dans la vérification, soit un effort d'ancrage de référence (en valeur de calcul) pour cette situation de 279 + 533 = 812 kN/m.

La stabilité du massif d'ancrage est vérifiée si l'effort d'ancrage de référence $T_{réf,d}$ ainsi calculé est inférieur à celui provoquant la déstabilisation du massif $T_{dsb,d}$ et ce pour toutes les situations examinées. Dans le cas présent, cette condition n'est pas vérifiée ce qui reflète le caractère insuffisant de la longueur libre choisie en première approche pour les tirants.

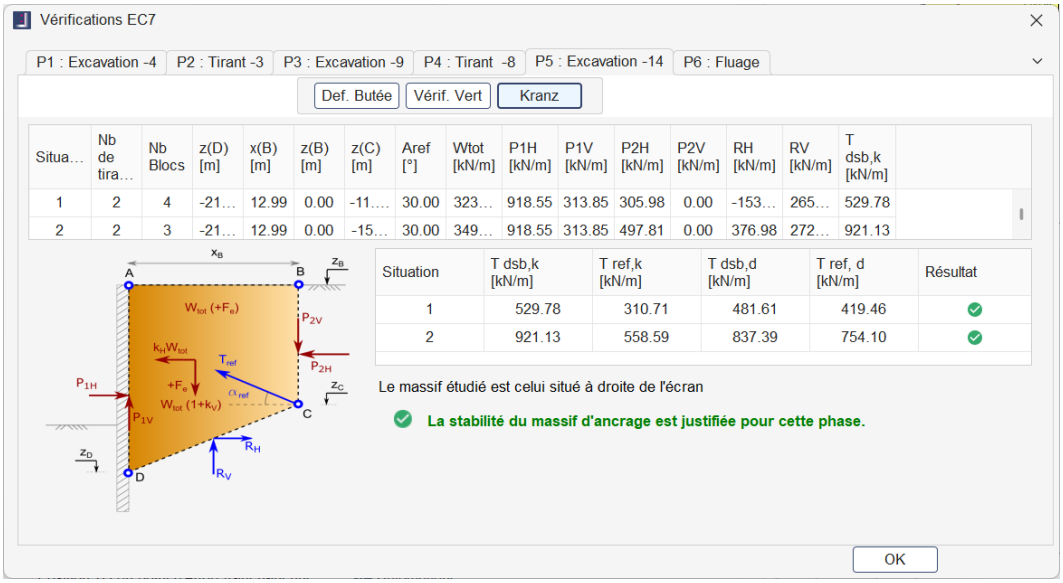
D.4.6 Revue de la longueur libre des tirants

A présent, on propose de reprendre le projet précédent en augmentant la longueur libre des tirants. Initialement, celle-ci a été prise égale à L_0 = 7 m, ce qui correspondait à une longueur utile $L_u = L_0 + L_s/2 = 7 + 10/2 = 12$ m.

On propose de reconduire les calculs avec les valeurs suivantes de L_0, en actualisant à chaque fois la valeur de la longueur utile L_u ainsi que celle de la raideur K, et ce pour les deux tirants (paramètres des actions tirants en phases 2 et 4).

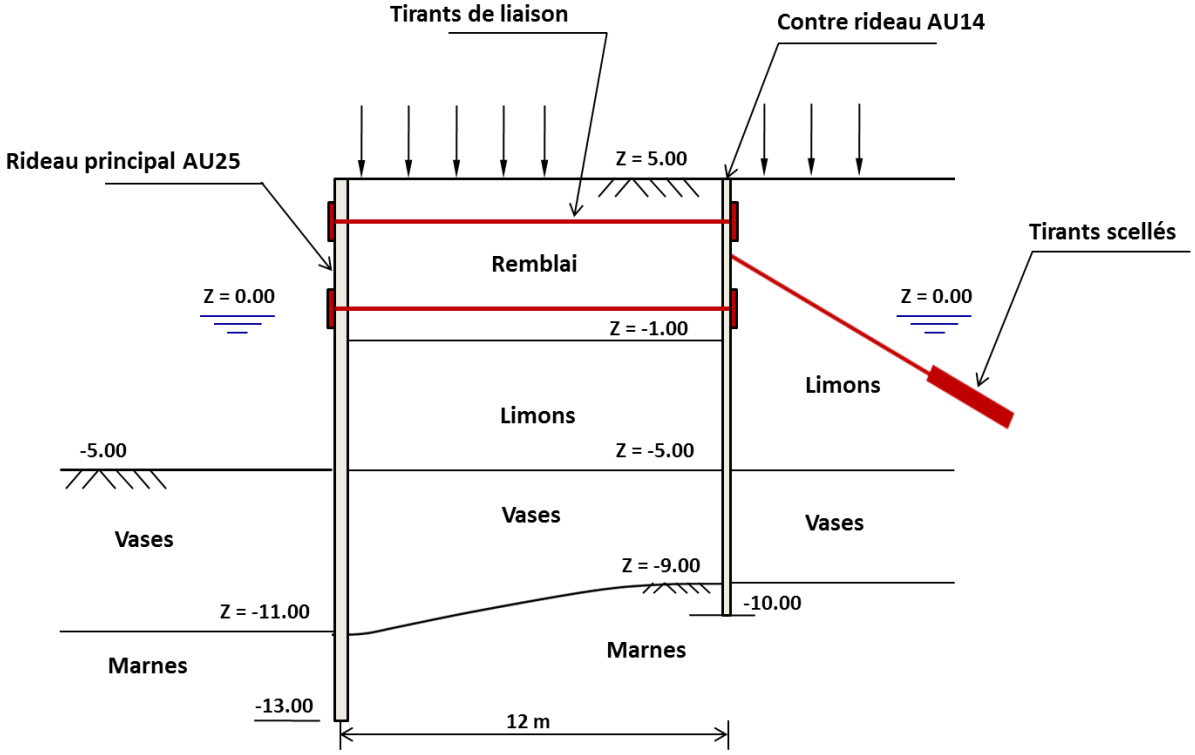
	Longueur libre L_0	Longueur de scellement L_s	Longueur utile L_u	$K_{tirant,sup}$ (kN/m/m)	$K_{tirant,inf}$ (kN/m/m)
Cas initial (0)	7,0 m	10,0 m	12,0 m	12 500	18 750
Cas 1	8,0 m	10,0 m	13,0 m	11 500	17 310
Cas 2	9,0 m	10,0 m	14,0 m	9 900	14 835
Cas 3	10,0 m	10,0 m	15,0 m	7 900	11 870

En relançant les calculs pour chaque cas ci-dessus et en analysant les résultats de la vérification Kranz, on constate que la justification de la stabilité du massif d'ancrage requiert une longueur libre au moins égale à 10 m pour les deux tirants (cas 3). Le résultat obtenu dans ce cas (L_u = 15 m) est présenté dans la figure ci-dessous (phase 5).



D.5. Tutoriel 5 : Aménagement d'un quai maritime

L'exemple étudié est celui d'un quai maritime constitué d'un rideau de palplanches ancré sur un contre-rideau. Celui-ci est lui-même ancré par un lit de tirants scellés.



Cet exercice vise à illustrer les points suivants :

- Démarche de modélisation d'un système « rideau / contre-rideau » ;
- Modélisation des travaux de terrassement ;
- Vérifications ELU pour un calcul double-écran.

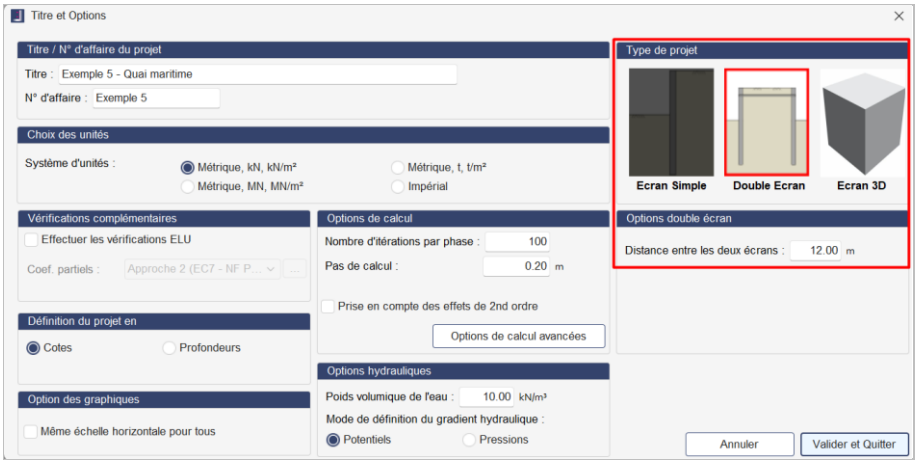
D.5.1 Saisie des données

D.5.1.1. Titre et options

Après avoir lancé K-Réa en mode « Nouveau projet », accéder à la fenêtre titres et options. Remplir « Titre » et « N° d'affaire ».

Sélectionner dans cette fenêtre un projet de type « Double-écran ». Il faudra ensuite indiquer la « distance entre les deux écrans » : celle-ci est prise égale à 12,00 m dans le cadre de cet exercice.

Laisser ensuite les autres paramètres à leurs valeurs par défaut.



K-Réa demande alors d'enregistrer le nouveau projet : définir le nom et le répertoire souhaités.

Définition des couches de sol

Le terrain en place en interaction avec l'ouvrage comporte trois couches. Leurs caractéristiques générales sont récapitulées dans le tableau suivant.

Couche	z (m)	γ (kN/m³)	γ' (kN/m³)	φ (°)	c (kPa)	dc (kN/m²/m)	δ_a/φ (-)	δ_p/φ (-)
Limons sableux	+5,00	20	10	30	0	0	0,66	-0,33
Vases argileuses	-5,00	19	9	25	5	0	0,66	-0,33
Substratum marneux	-9,00 à -11,00	20	10	30	30	0	0,66	-0,33

Utiliser ensuite les assistants de K-Réa pour calculer les paramètres permettant de générer les coefficients $k_0/k_a/k_p$. Le coefficient de réaction k_h est imposé pour chaque couche comme l'indique le tableau ci-dessous.

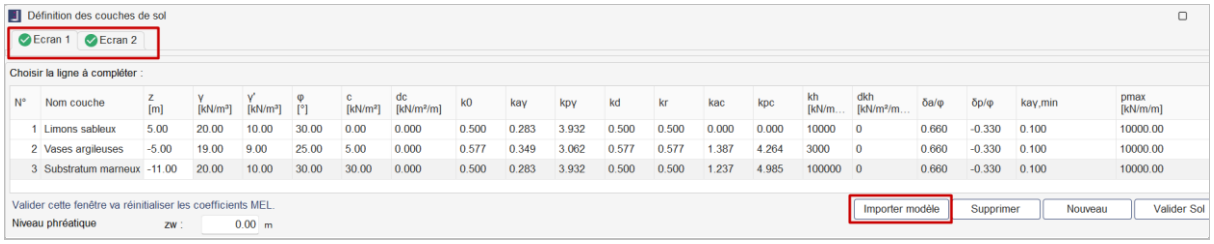
Couche	k_0 (-)	$k_{a\gamma}$ (-)	$k_{p\gamma}$ (-)	k_{ac} (-)	k_{pc} (-)	k_h (kN/m²/m)
Limons sableux	0,500	0,283	3,932	0	0	10 000
Vases argileuses	0,577	0,349	3,062	1,387	4,264	3 000
Substratum marneux	0,500	0,283	3,932	1,237	4,985	100 000

Les autres paramètres sont conservés à leurs valeurs par défaut. Laisser pour cela la case **Modifier les paramètres avancés** décochée.

Le niveau initial de la nappe est pris à la cote zw = +0,00.

Le toit du substratum marneux est pris à -11,00 au droit de l'écran 1 (écran principal) et à -9,00 au droit de l'écran 2 (contre-écran).

Les figures suivantes illustrent la synthèse à laquelle il faudra aboutir une fois les paramètres de sol renseignés pour les deux écrans.



N°	Nom couche	z [m]	γ [kN/m³]	γ' [kN/m³]	φ [°]	c [kN/m²]	dc [kN/m²/m]	k0	kaγ	kpγ	kd	kr	kac	kpc	kh [kN/m…	dkh [kN/m²/m…	δa/φ	δp/φ	kaγ,min	pmax [kN/m/m]
1	Limons sableux	5.00	20.00	10.00	30.00	0.00	0.000	0.500	0.283	3.932	0.500	0.500	0.000	0.000	10000	0	0.660	-0.330	0.100	10000.00
2	Vases argileuses	-5.00	19.00	9.00	25.00	5.00	0.000	0.577	0.349	3.062	0.577	0.577	1.387	4.264	3000	0	0.660	-0.330	0.100	10000.00
3	Substratum marneux	-11.00	20.00	10.00	30.00	30.00	0.000	0.500	0.283	3.932	0.500	0.500	1.237	4.985	100000	0	0.660	-0.330	0.100	10000.00

Il est possible d'importer dans l'écran 2 les paramètres déjà renseignés pour l'écran 1 en allant dans l'onglet « Ecran 2 » et en cliquant sur **Importer Modèle**. Modifier ensuite la cote du toit des Marnes à -9,00 pour l'écran 2.

Cliquer sur **Valider et quitter**.

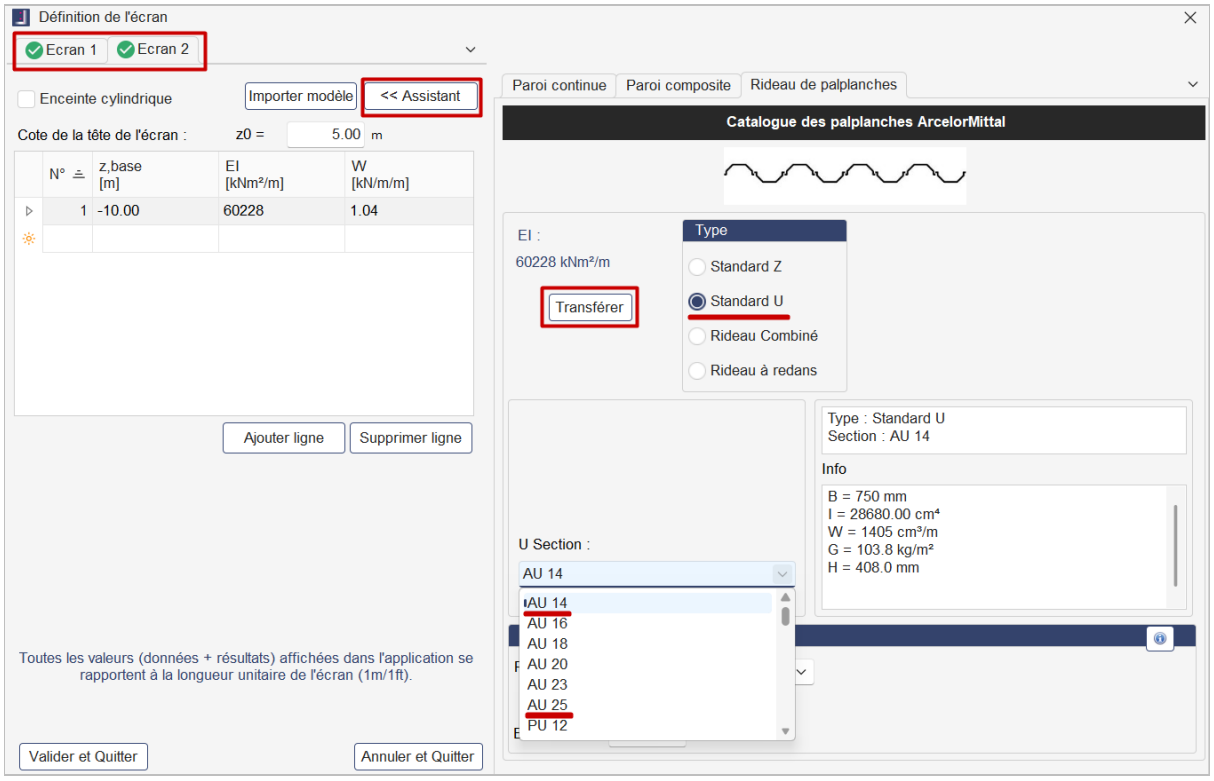
Pour consulter ou modifier les couches de sol ultérieurement, cliquer sur **Menu Données**, puis sur **Définition des couches de sol**.

D.5.1.2. Définition des écrans

Après avoir validé les caractéristiques des couches, il convient de définir celles des écrans. Les caractéristiques à entrer sont les suivantes :

	z_0 (-)	z_{base} (-)	Type	EI (kNm²/m)	W (kN/m/m)
Ecran 1	+5,00	-13,00	AU25	118 104	1,47
Ecran 2	+5,00	-10,00	AU14	60 228	1,04

Nota : Il est possible d'utiliser l'assistant « Rideau de palplanches » afin d'importer directement les paramètres EI et W de chaque écran.

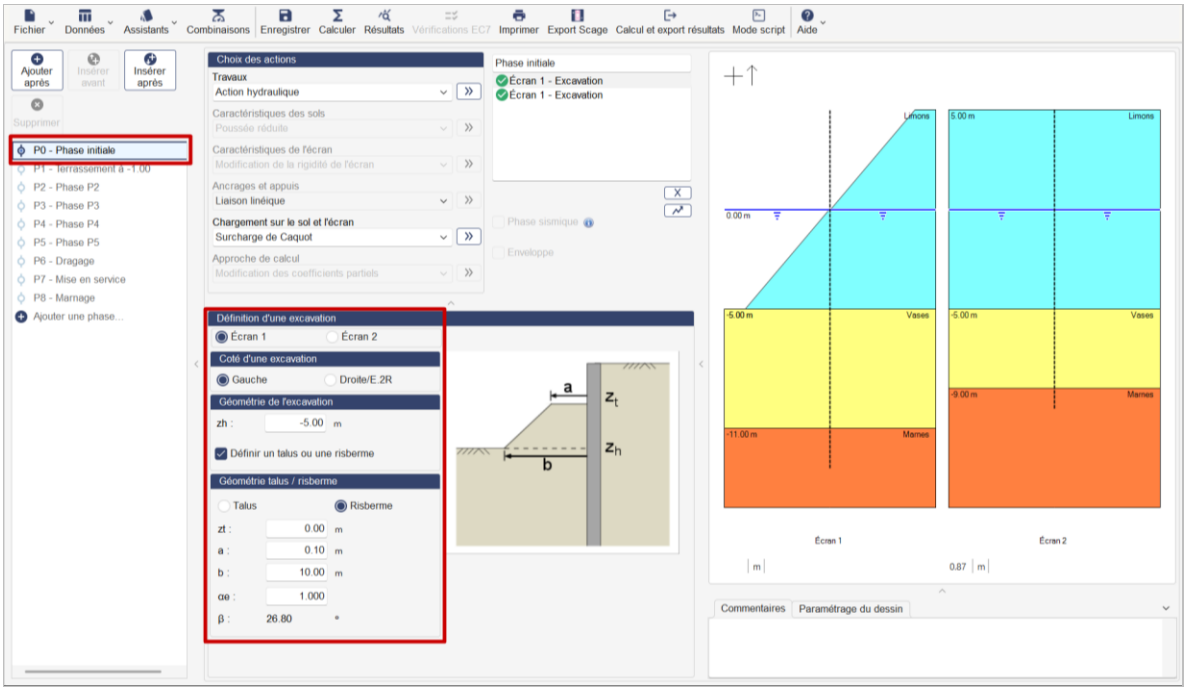


D.5.2 Définition du phasage

D.5.2.1. Phase initiale

Le terrain initial est représenté par un talus 2H/1V de part et d'autre de l'écran 1. Le terrain est supposé horizontal au droit de l'écran 2. Il convient donc de définir les actions suivantes :

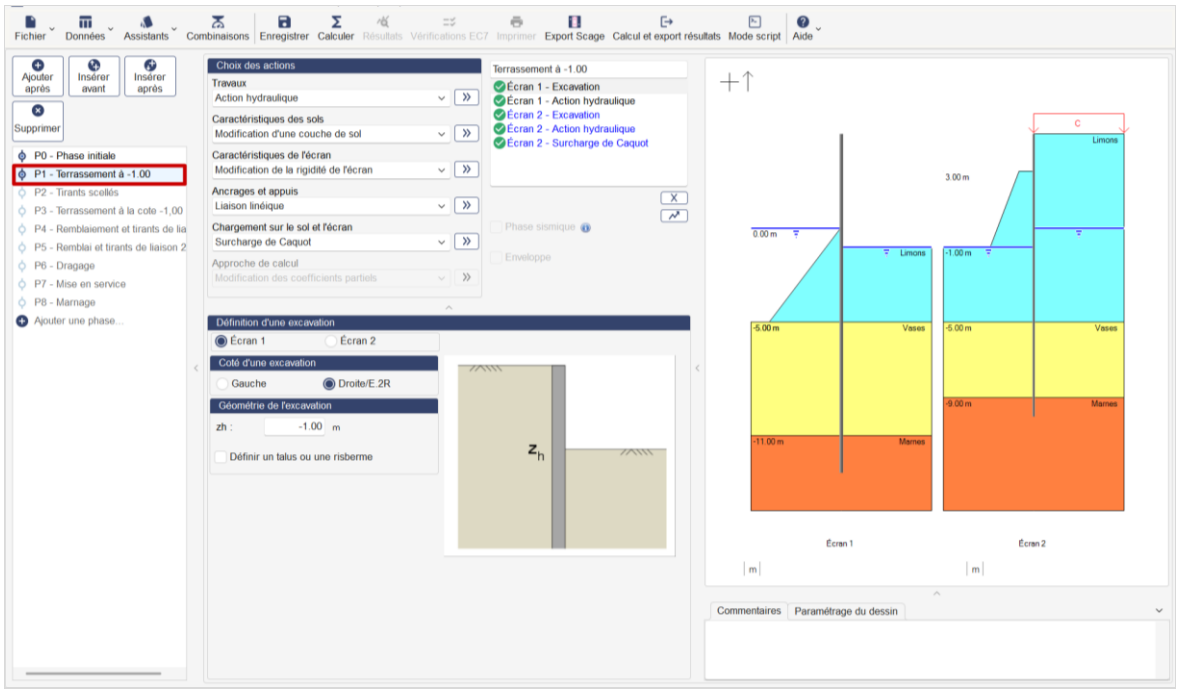
- Action « Excavation » à gauche de type « Risberme »
  - z_h = -5,00 m z_t = +0,00 m
  - a = 0,10 m b = 10,00 m
- Action « Excavation » à droite de type « Talus »
  - z_h = +0,00 m z_t = +5,00 m
  - a = 10,00 m b = 0,10 m



D.5.2.2. Phase 1 : Terrassement à la cote -1,00

On simule dans cette phase les travaux de terrassement entre les deux rideaux à -1,00 m avec création d'une risberme à gauche de l'écran 2. Les actions à définir sont donc les suivantes :

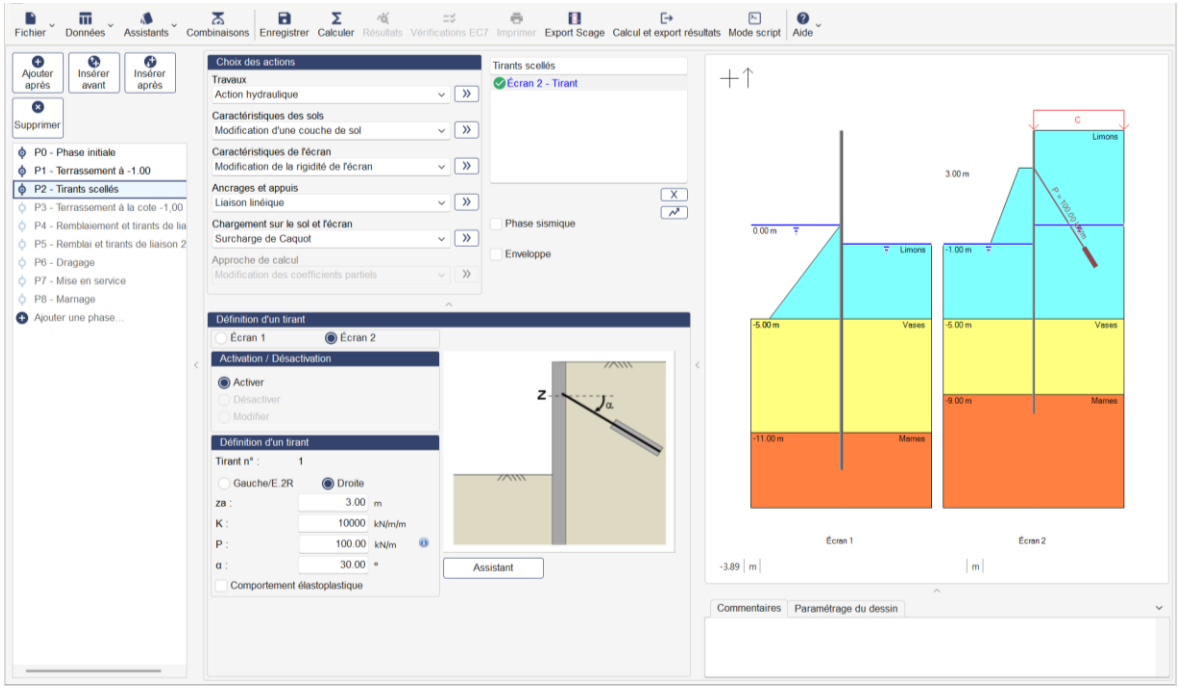
Ecran 1	Ecran 2
Action Excavation à droite à -1,00 m	Action Excavation à gauche à -1,00 m avec Risberme : • z_h = -1,00 m z_t = +3,00 m • a = 2,00 m b = 6,00 m
Action Hydraulique à droite à -1,00 m	Action Hydraulique à gauche à -1,00 m
	Surcharge de Caquot de 10 kN/m/m à droite à z = +5,00 m



D.5.2.3. Phase 2 : Tirants scellés

On simule dans cette phase la mise place d'un lit de tirants scellés à l'arrière du contre-rideau. Il convient donc de définir les actions suivantes :

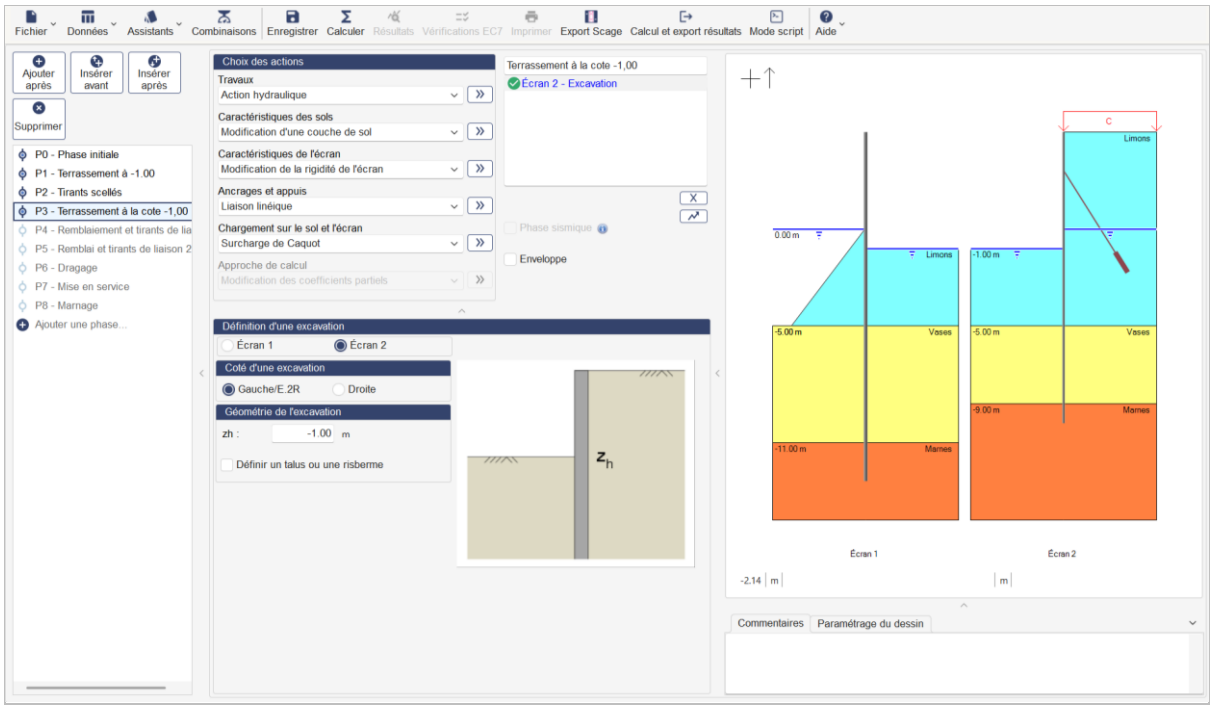
Ecran 1	Ecran 2
	Action « Tirant » à droite avec : za = +3,00 m K = 10 000 kN/m/m P = 100 kN/m α = 30°



D.5.2.4. Phase 3 : Terrassement à la cote -1,00 (suite et fin)

Suppression de la risberme à gauche de l'écran 2. Il convient donc de définir pour l'écran 2 :

- Action « Excavation » à gauche avec :
  - zh = -1,00 m

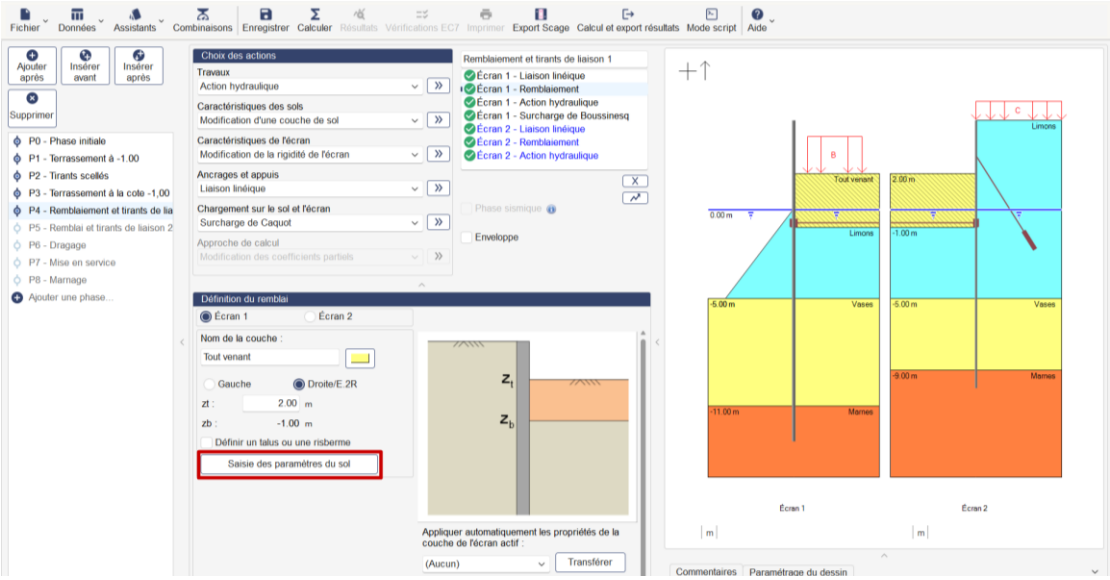


D.5.2.5. Phase 4 : Remblaiement et tirants de liaison 1

On simule dans cette phase la mise en place du premier lit des tirants de liaison suivie d'un remblaiement jusqu'à +2,00 entre les deux rideaux. Les actions à définir dans cette phase :

Ecran 1	Ecran 2
Action Liaison linéique à droite avec • Type : Tirant • zaa = zab = -0,75 m • K = 10 000 kN/m/m • P = 0 kN/m	La même action est automatiquement copiée à gauche de l'écran 2.
Action Remblaiement à droite jusqu'à la cote +2,00 avec : • Nom de la couche : Tout venant • Paramètres du sol : cf. ci-après	Action Remblaiement à gauche jusqu'à la cote +2,00 avec : • Nom de la couche : Tout venant • Paramètres du sol : cf. ci-après
Action hydraulique à droite à +0,00	Action hydraulique à gauche à +0,00 m
Action surcharge de Boussinesq à droite à z = +2,00 m avec : • x = 2,0 m L = 8,0 m • q = 50 kN/m/m α_e = 1,33	

Nota : lors de la définition de l'action remblaiement pour l'écran 2, il est possible de récupérer les paramètres déjà saisis pour le remblai de l'écran 1 à l'aide de l'assistant d'importation situé sous la figure d'aide de l'action remblaiement (penser à utiliser la Base de Données des sols : BDD).



Les caractéristiques du remblai sont à renseigner dans la fenêtre accessible via le bouton **Saisie des paramètres du sol**.

γ (kN/m³)	γ' (kN/m³)	φ (°)	c (kPa)	dc (kN/m²/m)	δ_a/φ (-)	δ_p/φ (-)
20	10	33	0	0	0.66	-0.33

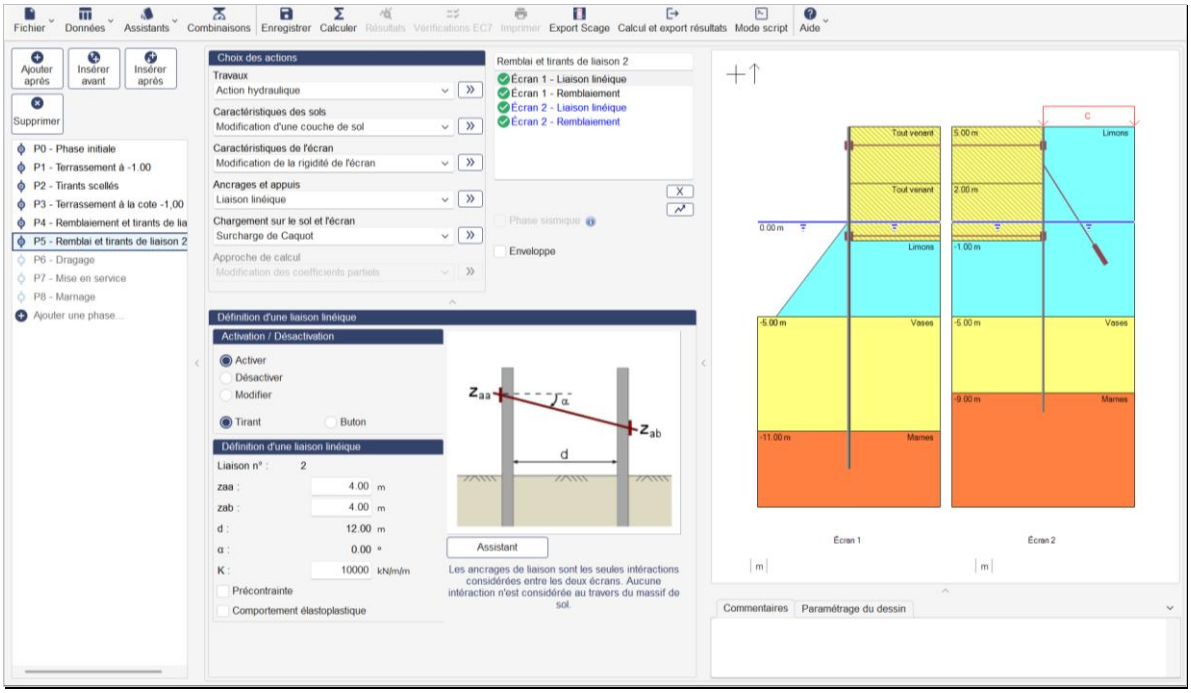
k_0 (-)	$k_{a\gamma}$ (-)	$k_{p\gamma}$ (-)	k_{ac} (-)	k_{pc} (-)	k_h (kN/m²/m)
0.455	0.249	4.740	0	0	10 000

Les autres paramètres sont conservés à leurs valeurs par défaut. Laisser pour cela la case **Modifier les paramètres avancés** décochée.

D.5.2.6. Phase 5 : Fin de remblaiement et tirants de liaison 2

On simule dans cette phase la mise en place du second lit des tirants de liaison suivie d'un remblaiement jusqu'à +5,00 m entre les deux rideaux. Les actions à définir dans cette phase :

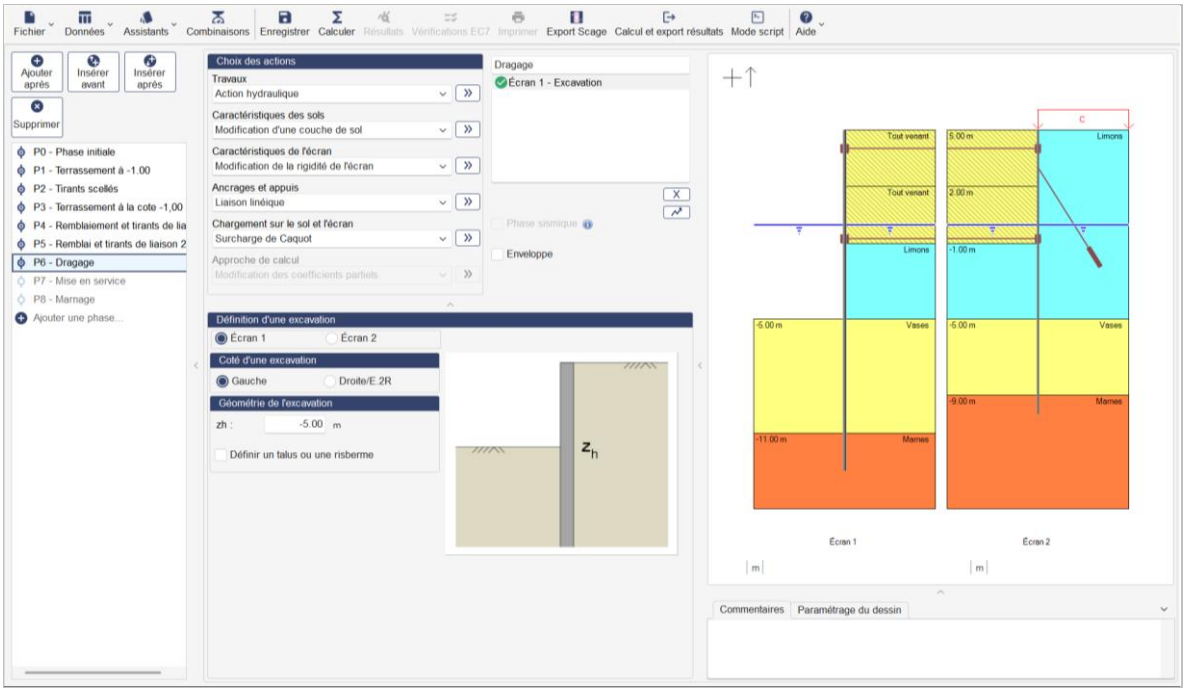
Ecran 1	Ecran 2
Action Liaison linéique à droite avec • Type : Tirant • zaa = zab = +4,00 m • K = 10 000 kN/m/m • P = 0 kN/m	La même action est automatiquement copiée à gauche de l'écran 2.
Action Remblaiement à droite jusqu'à la cote +5,00 avec : • Nom de la couche : Tout venant Paramètres du sol : idem que phase précédente	Action Remblaiement à gauche jusqu'à la cote +5,00 avec : • Nom de la couche : Tout venant • Paramètres du sol : idem que phase précédente



D.5.2.7. Phase 6 : Dragage à la cote -5,00

On simule dans cette phase le dragage des terres à l'aval du rideau principal. Cela se traduit par un terrassement horizontal à la cote -5,00. Il convient donc de définir pour l'écran 1 :

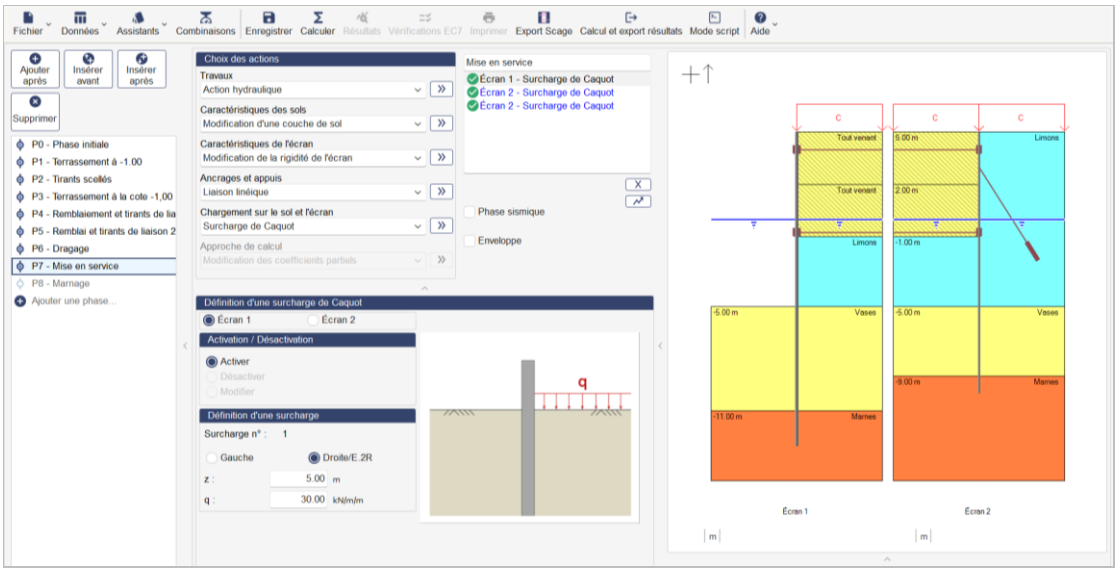
- Action Excavation à gauche à -5,00 m



D.5.2.8. Phase 7 : Mise en service

On applique dans cette phase les surcharges représentatives de l'exploitation du quai. Les actions à définir sont les suivantes :

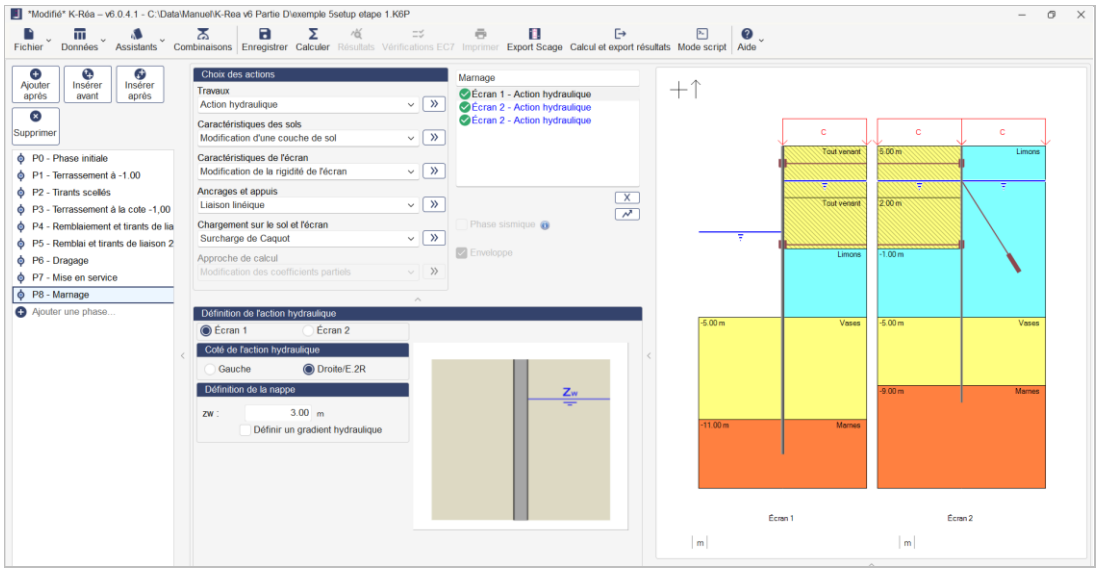
Ecran 1	Ecran 2
Action Surcharge de Caquot de 30 kN/m/m à droite à z = +5,00 m	Action Modification surcharge de Caquot à droite, nouvelle valeur q = 30 kN/m/m.
	Action Surcharge de Caquot de 30 kN/m/m à gauche à z = +5,00 m



D.5.2.9. Phase 8 : Situation de marnage

Cette phase simule la phase transitoire qui suit une situation de marnage (hautes eaux à +3,00) où l'équilibre hydraulique n'est pas encore rétabli entre les deux côtés de l'écran principal.

Ecran 1	Ecran 2
Action Hydraulique à droite à z_w = +3,00 m	Action Hydraulique à droite à z_w = +3,00 m
	Action Hydraulique à gauche à z_w = +3,00 m



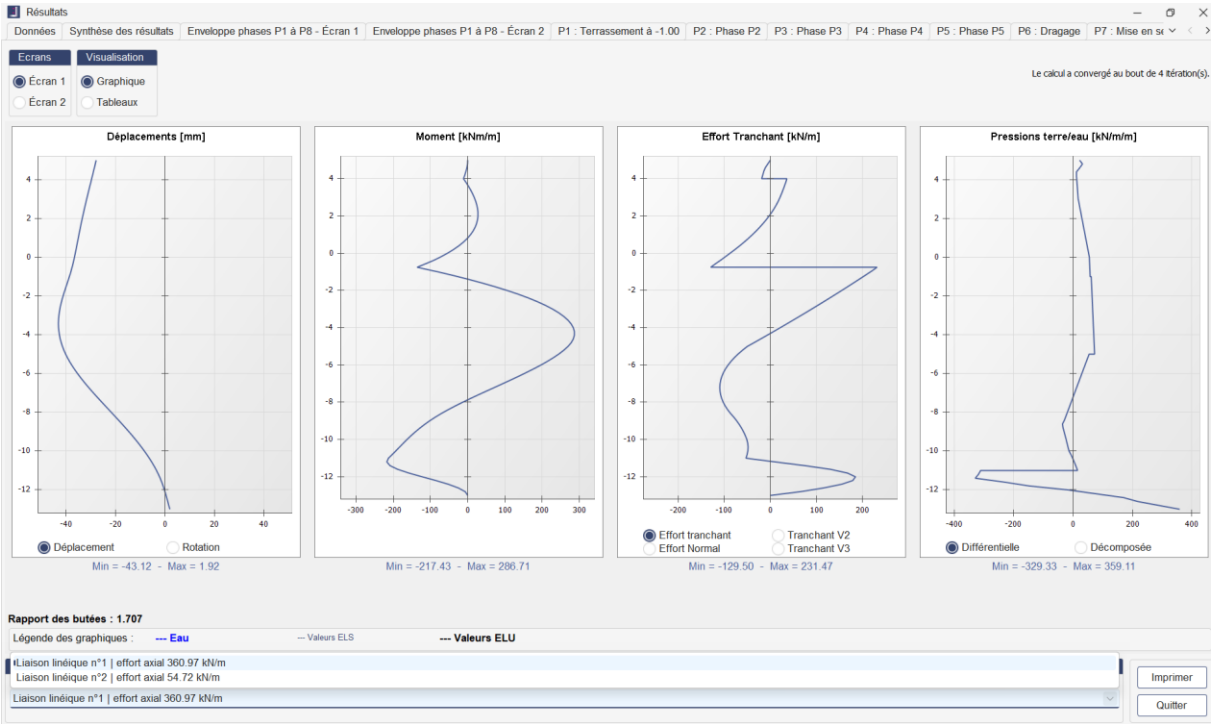
D.5.3 Résultats

D.5.3.1. Efforts et déplacements

L'analyse des résultats obtenus appelle les commentaires suivants :

- La phase la plus défavorable est la phase de marnage pour laquelle la flèche du rideau principal dépasse 4 cm. Le moment fléchissant maximal est de l'ordre de 285 kNm/m au niveau de l'écran 1 et de 265 kNm/m pour l'écran 2 ;
- Le déplacement en phase de service reste inférieur ou égal à 3,0 cm ;
- Le rapport des butées est de l'ordre de 2,1 pour la phase de service (écran principal) et de 1,8 pour la situation de marnage (écran principal également), ce qui est acceptable ;

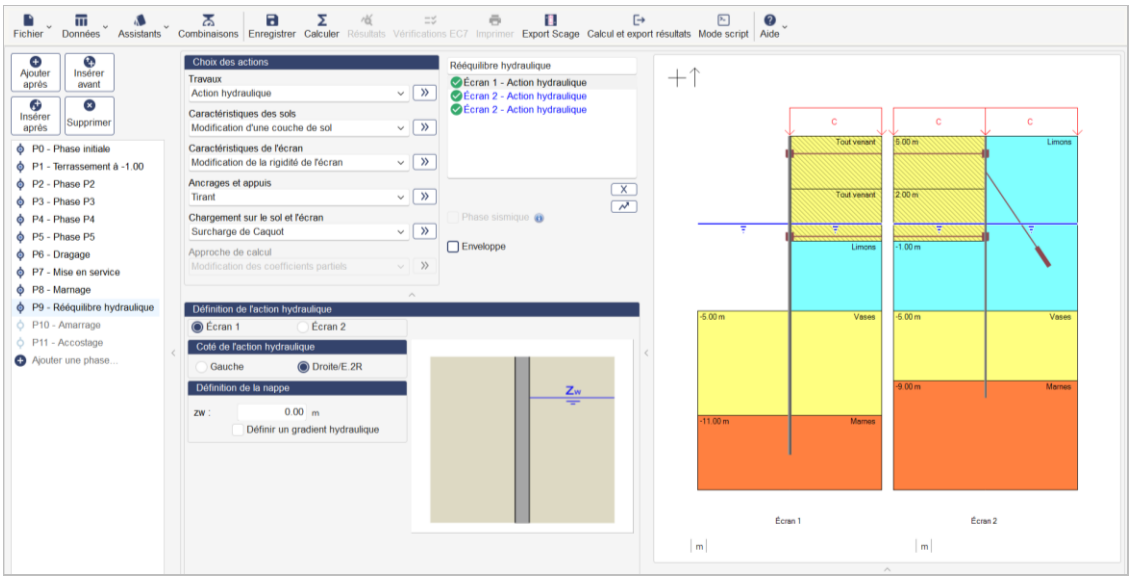
Les tirants de liaison travaillent à 359 kN/m au maximum (marnage – lit inférieur). L'effort axial maximal dans les tirants scellés atteint 138 kN/m en situation de marnage.



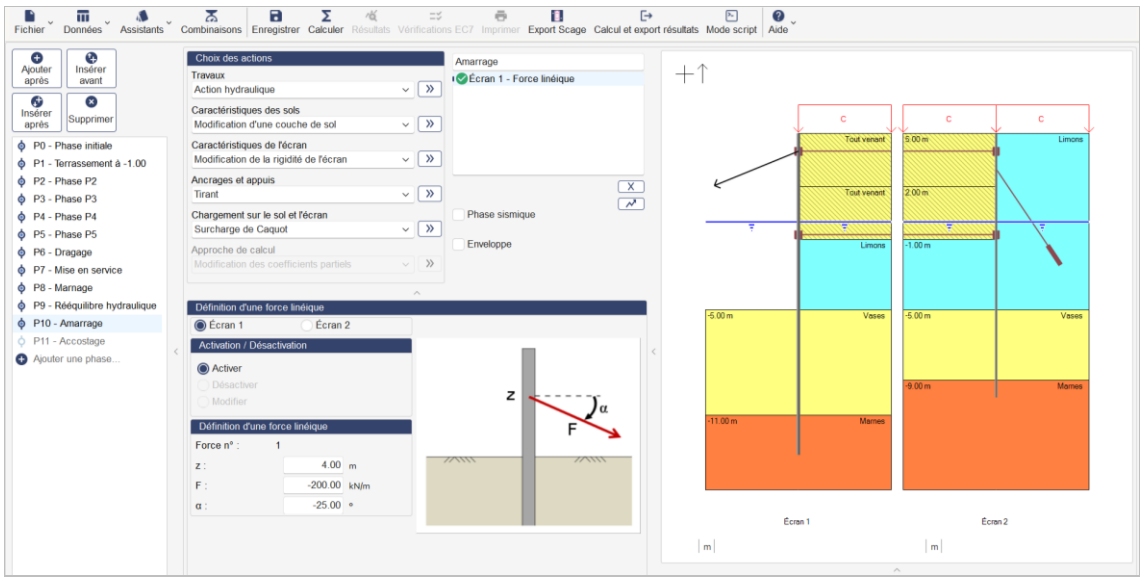
D.5.3.2. Amarrage / Accostage

On propose à présent d'examiner l'effet des forces d'amarrage et d'accostage sur le comportement de l'ouvrage. On complète le phasage déjà défini par trois phases additionnelles :

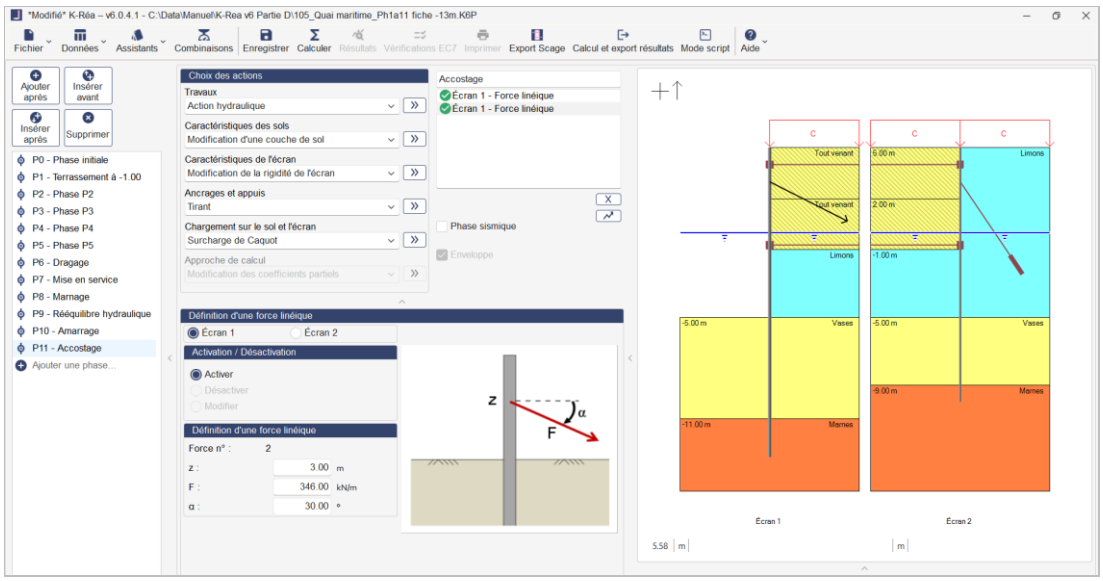
- **Phase 9** : rétablissement de l'équilibre hydraulique avec niveau d'eau à +0,00 en tout point.



- **Phase 10** : situation d'amarrage représentée par l'application d'une force linéique d'intensité égale à -200 kN/m directement sur l'écran 1 à la cote +4,00 et inclinée à α = -25° par rapport à l'horizontale ;

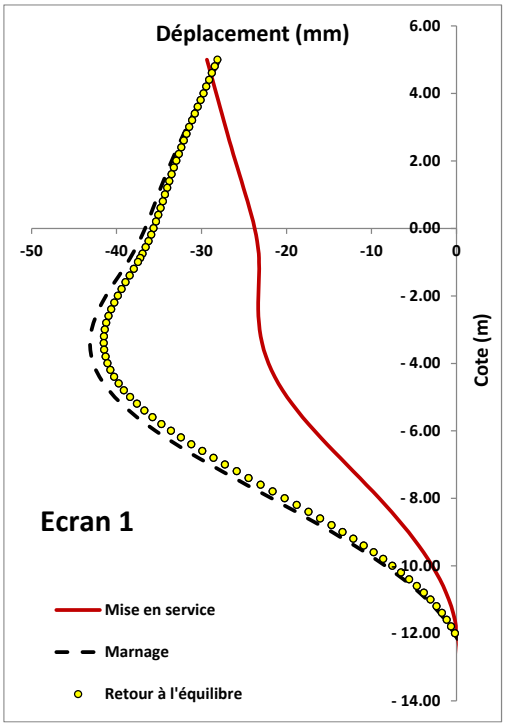


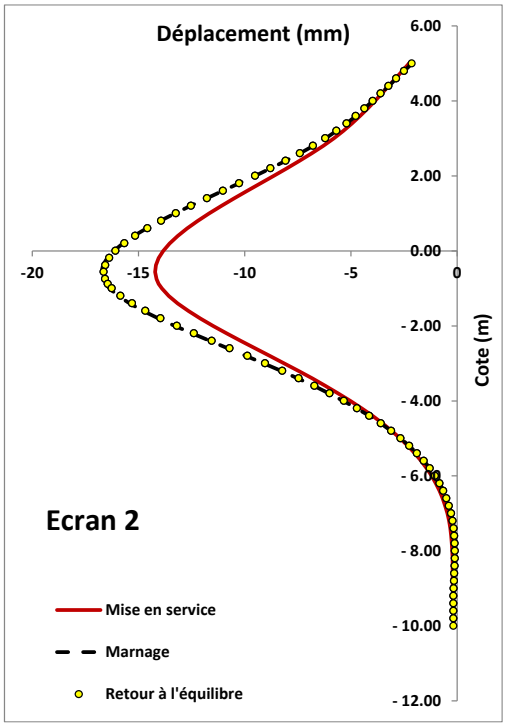
- **Phase 11** : situation d'accostage représentée par l'application d'une force linéique d'intensité égale à +346 kN/m directement sur l'écran 1 à la cote +3,00 et inclinée à α = +30° par rapport à l'horizontale. Il convient de désactiver dans cette phase la force linéique définie à la phase précédente.



Relancer le calcul et accéder aux résultats obtenus. La figure suivante compare le résultat de la phase 9 correspondant au rétablissement de l'équilibre hydraulique à celui des phases 8 (marnage) et 7 (mise en service).

La situation de « marnage » provoque un déplacement additionnel de de l'ordre de 2 cm par rapport à la situation de service. Le retour à l'équilibre hydraulique ne permet pas d'annuler ce déplacement additionnel : la déformée de l'écran après rétablissement de la nappe à +0.00 m reste voisine de celle qui a été obtenue en situation de marnage, ce qui est synonyme d'un comportement « irréversible » de l'ouvrage lié à la plastification des sols sous l'effet des sollicitations additionnelles en situation de marnage. Le même comportement est observé pour le contre-rideau.





Les résultats des phases d'amarrage et d'accostage sont récapitulés dans le tableau suivant en comparaison avec la phase 9.

	Flèche (mm)	$M_{max,écran\ 1}$ (kNm/m)	$M_{max,écran\ 2}$ (kNm/m)	$T_{liaison,sup}$ (kN/m)	$T_{liaison,inf}$ (kN/m)	$T_{scellés}$ (kN/m)
Phase 09	41	280	261	55	348	138
Phase 10	49	262	259	192	361	157
Phase 11	41	275	258	100	351	148

D.5.3.3. Vérifications ELU

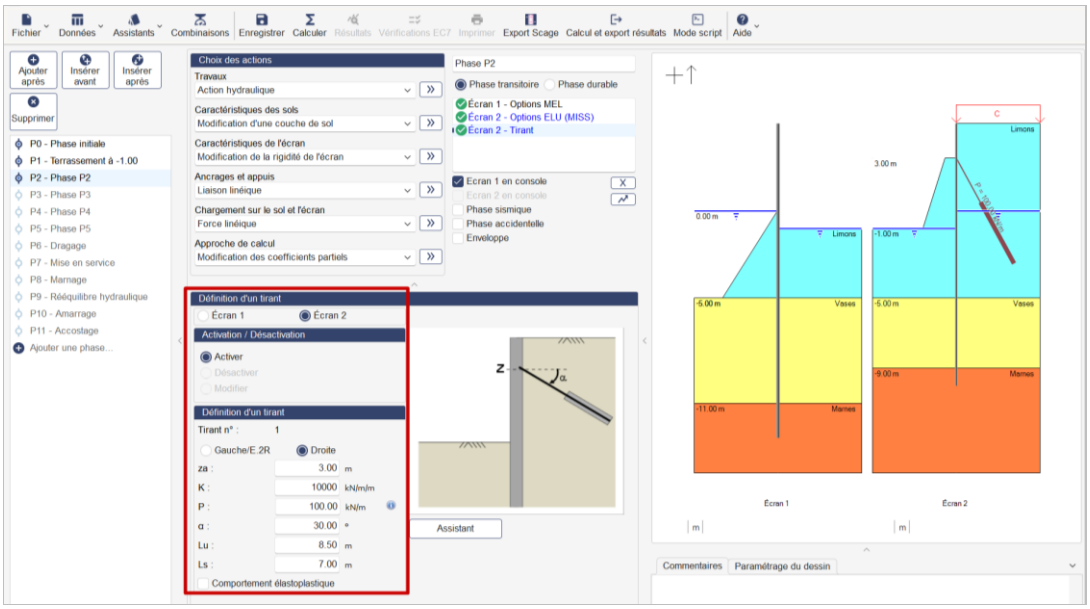
Les résultats précédents peuvent être complétés par ceux relatifs au calcul aux états limites ultimes. Aller pour cela dans l'onglet « Titres et Options » et cocher la case « Effectuer les vérifications ELU ». L'approche sélectionnée par défaut est celle de la norme Ecran NF P 94 282 (approche 2/2*).

Le fait d'activer les vérifications ELU permet notamment de :

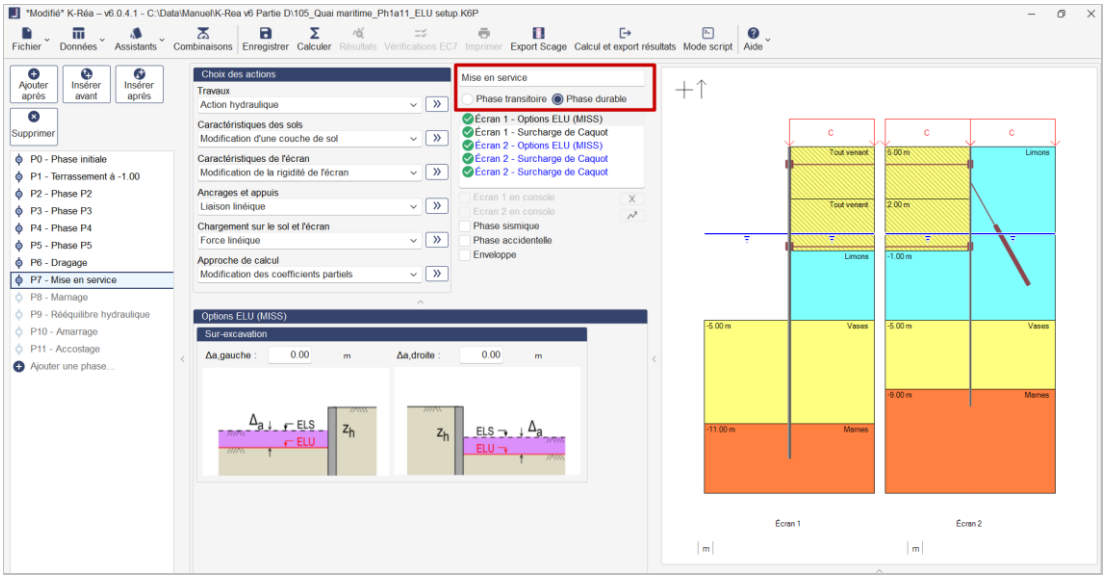
- déterminer les sollicitations ELU destinées à la justification de la résistance structurale des éléments de soutènement (palplanches, tirants, etc.) ;
- justifier la distance qui sépare les deux écrans vis-à-vis de la stabilité du massif d'ancrage (modèle Kranz) ;
- vérifier la pertinence des inclinaisons de poussée/butée et d'évaluer le cas échéant l'effort à prendre en compte pour la vérification de la stabilité au poinçonnement des écrans.

Avant de relancer les calculs, il convient de compléter le phasage par les éléments suivants :

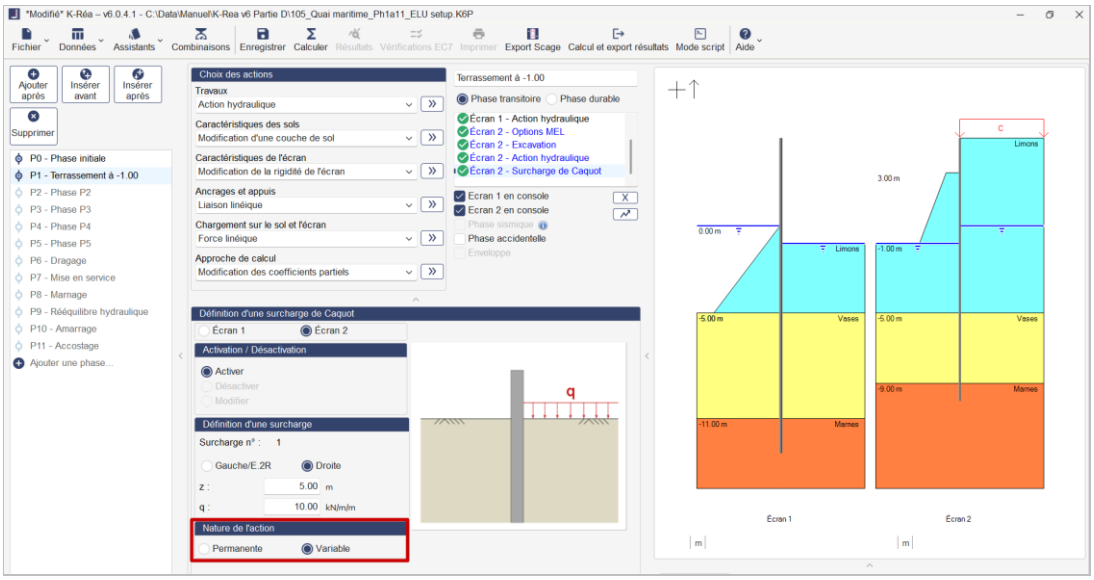
- **Phase 02** / Ecran 2 / Action « Tirant » - compléter par les informations suivantes :
  - Longueur utile du tirant Lu = 8,5 m
  - Longueur scellée du tirant Ls = 7,0 m.



- **Phases 07 (mise en service) et 09 (retour à l'équilibre hydraulique)** à déclarer comme « phase durable ». Les autres phases sont déclarées par défaut comme « phase transitoire ».

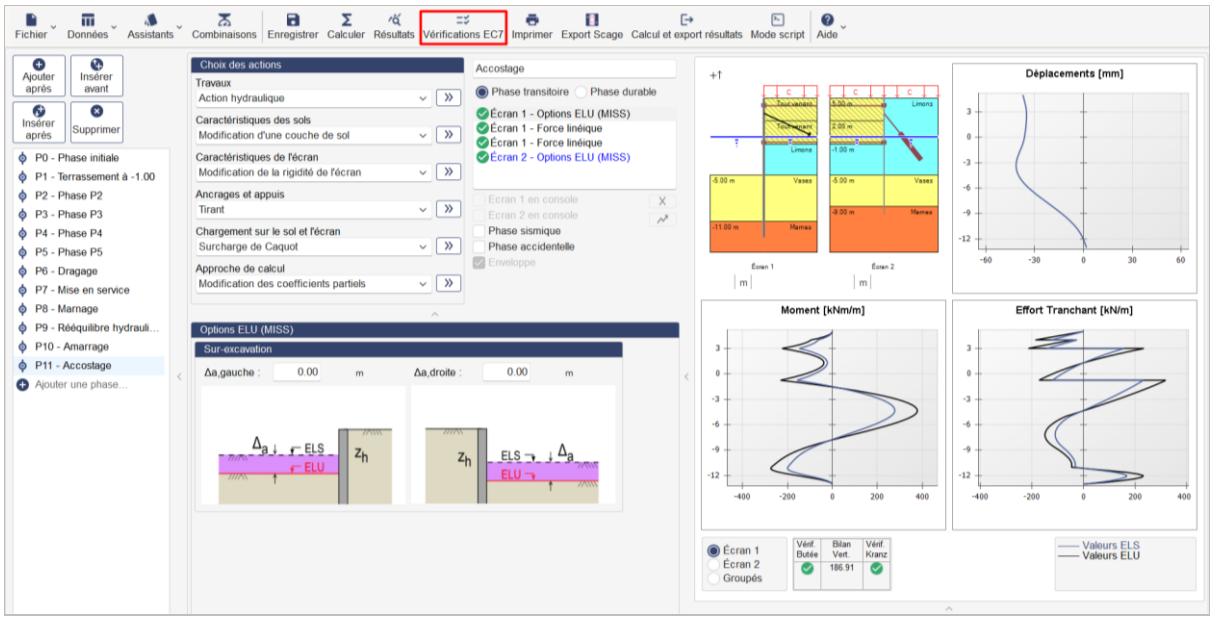


- **Phase 01** / Ecran 2 / Droite / « Surcharge de Caquot » - Nature = Variable.

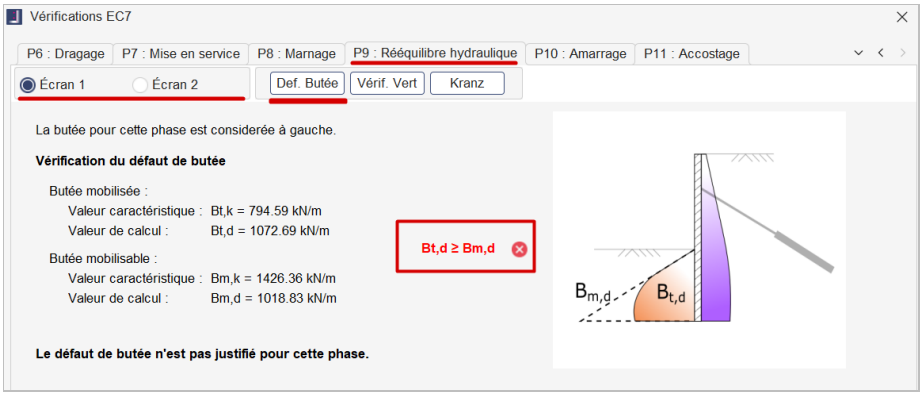


- **Phase 04** / Ecran 1 / Droite / « Surcharge de Boussinesq » - Nature = Variable.
- **Phase 07** / Ecran 1 / Droite / « Surcharge de Caquot 1 » - Nature = Variable.
- **Phase 07** / Ecran 2 / Droite / « Surcharge de Caquot 1 » - Nature = Variable.
- **Phase 07** / Ecran 2 / Gauche / « Surcharge de Caquot 2 » - Nature = Variable.
- **Phase 10** / Ecran 1 / « Force linéique 1 » - Nature = Variable (Défavorable).
- **Phase 11** / Ecran 1 / « Force linéique 2 » - Nature = Variable (Défavorable).

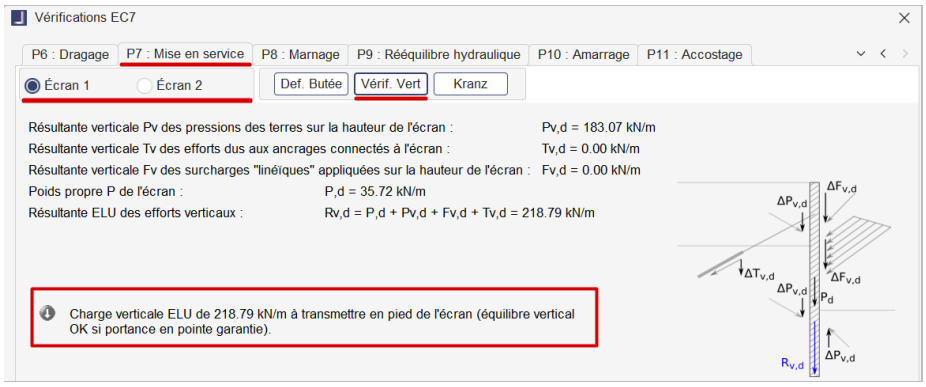
Relancer les calculs et accéder directement aux vérifications EC7.



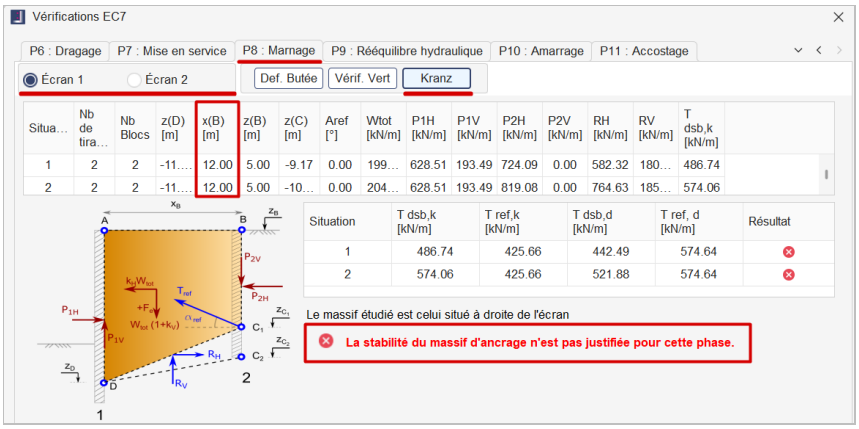
- **Défaut de butée** : la stabilité de l'écran est justifiée vis-à-vis du défaut de butée pour l'ensemble des phases et pour les deux écrans à l'exception de la phase de retour à l'équilibre hydraulique considérée comme durable (déformations plastiques irréversibles développées lors de la situation de marnage) où la fiche de l'écran principal (écran 1) ne permet pas une sécurité suffisante vis-à-vis du mécanisme de rupture par défaut de butée. Un allongement de l'écran 1 est donc nécessaire.



- **Equilibre vertical** : la vérification du bilan vertical des efforts conduit à une résultante vers le bas pour l'ensemble des phases et pour les deux écrans. L'effort vertical maximal à reprendre (à l'ELU) en pointe de l'écran est de :
  - $\mathbf{R_{v,d}}$ = 219 kN/m pour l'écran 1 – atteint en phase 7 (mise en service) ;
  - $\mathbf{R_{v,d}}$ = 171 kN/m pour l'écran 2 – atteint en phase 3 (suppression risberme).



- **Kranz** : la vérification de la stabilité du massif d'ancrage vise à valider les longueurs utiles des tirants scellés et des tirants de liaison. Le résultat de l'analyse valide la longueur utile retenue pour le tirant scellé de l'écran 2. La stabilité du massif d'ancrage n'est en revanche pas justifiée pour l'écran 1 en phases 8 (marnage) et 10 (amarrage). Cela impose donc de revoir la conception du soutènement en augmentant la distance séparant les deux écrans (et donc la longueur des tirants de liaison).



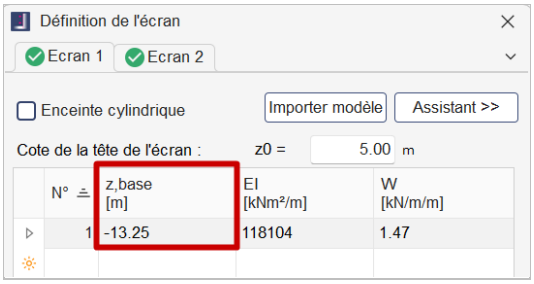
D.5.3.4. Revue de la conception de l'ouvrage

L'objet de ce paragraphe est de présenter les actions correctives imposées par le défaut de stabilité de l'ouvrage vis-à-vis des mécanismes suivants :

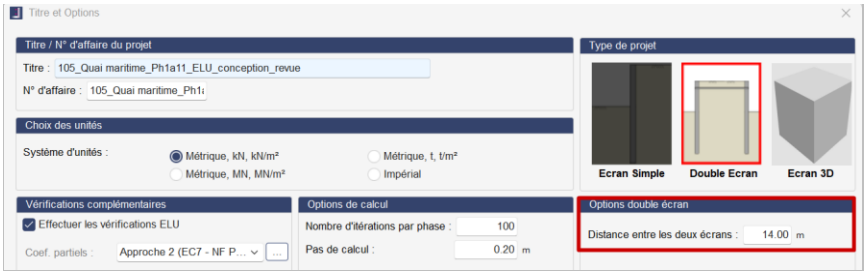
- Instabilité rotationnelle de l'écran 1 par défaut de butée ;
- Instabilité du massif d'ancrage associé au système rideau/contre-rideau.

Pour cela on propose ce qui suit :

- **Augmentation de la fiche** de l'écran principal de 25 cm : Ouvrir le menu « Définition de l'écran », sélectionner « Ecran 1 » et modifier la cote de la base à -13,25 au lieu de -13,00 ;



- **Augmentation de la distance** entre les deux écrans de 2 m : ouvrir le menu « Titre et Options » et modifier la distance « d » à 14 m au lieu de 12 m.



Relancer le calcul. Le résultat obtenu montre que l'ajustement proposé permet cette fois de valider l'ensemble des vérifications ELU.