



Tutorial 2g.14

Analyse de la stabilité d'une pente avec nappe phréatique

Réf : CESAR-TUT(2g.14)-v2025.0.1-FR

1. APERÇU

On étudie la stabilité d'une pente dans un massif homogène partiellement saturé. Ce modèle est extrait de l'exemple #3 d'Arai et Tagyo (1985).

Ce tutoriel présente deux aspects importants pour les modélisations géotechniques :

- Modélisation d'une nappe,
- Calcul d'un coefficient de sécurité sur la stabilité globale (procédure dite « c-phi réduction »).

La distribution de la pression interstitielle est calculée avec 2 méthodes différentes. La première méthode repose sur la définition d'un niveau de nappe et fait l'hypothèse que la pression interstitielle à un point donné en dessous de la nappe phréatique est calculée en mesurant la distance verticale à la nappe phréatique et en la multipliant par le poids volumique de l'eau (c'est une approximation qui suppose que l'écoulement est horizontal dans tout le massif). Dans la deuxième méthode, la distribution de la pression est calculée en exploitant une analyse en écoulement en régime permanent ou transitoire.

Le facteur de sécurité de la pente est défini comme suit :

$$c' = c / SRF \qquad \varphi' = \text{Arctan}(\tan \varphi / SRF)$$

Ce facteur est obtenu lorsque le calcul du modèle atteint la dernière solution convergente, qu'on établira comme dernier état d'équilibre avant la rupture de la pente.

2. SPECIFICATIONS

Hypothèses Générales

- Analyse statique en déformations planes,
- Nappe phréatique en régime permanent,
- Comportement non linéaire du sol.

	ρ (Kg/m ³)	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)	ψ (°)
Pente	1882	100	0,3	42	15	0

Géométrie

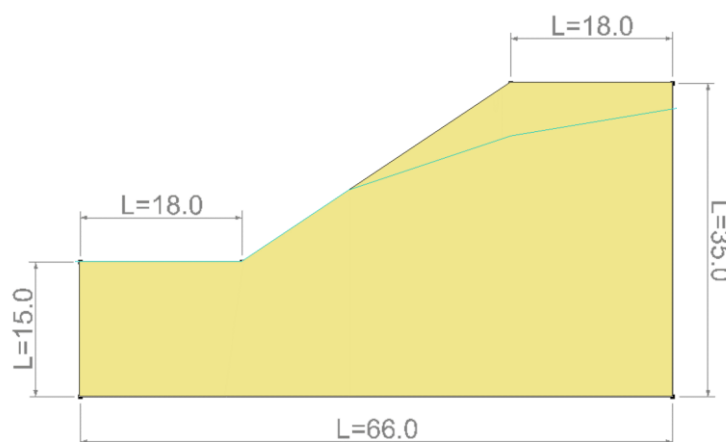


Figure 1: Situation du problème

3. PARAMÈTRES GÉNÉRAUX

1. Démarrer CESAR 2D.
2. Régler les unités dans le menu **Préférences > Unités**.
3. Dans l'arborescence, sélectionner l'option **General/Longueur** and régler l'unité **m** dans le cadre en bas à gauche.
4. Dans l'arborescence, sélectionner l'option **Mécanique/Force** et régler l'unité **kN** dans le cadran en bas à gauche.
5. Dans l'arborescence, sélectionner the l'option **Mécanique/Déplacement** et régler l'unité **mm**
6. Cliquer sur **Appliquer** et fermer.
7. Dans le **Plan de travail**, régler la grille à 1m (dX = dY = 2m)



Utiliser « Enregistrer par défaut » pour définir ce système d'unités comme environnement utilisateur.

4. EDITION DU MAILLAGE

4.1. Géométrie

Un nouveau projet commence toujours dans l'onglet GEOMETRIE.

Dimension de la géométrie :

Nous commençons d'abord par définir les limites externes de la pente.

1. Cliquer sur **Points** . La boîte de dialogue apparaît.
 - Entrer **(0 ; 0)** comme X and Y, et appuyer sur **Appliquer**.
 - Cocher sur "Points Liés" pour relier les points.
2. Entrer **(66 ; 0)**, et appuyer sur **Appliquer**. Le segment AB est créé.
3. Entrer **(66 ; 35)**, et appuyer sur **Appliquer**. Le segment BC est créé.
4. Entrer **(48 ; 35)**, et appuyer sur **Appliquer**. Le segment CD est créé.
5. Entrer **(18 ; 15)**, et appuyer sur **Appliquer**. Le segment DE est créé.
6. Entrer **(0 ; 15)**, et appuyer sur **Appliquer**. Le segment EF est créé.
7. Entrer **(0 ; 0)**, et appuyer sur **Appliquer**. Le segment FA est créé.



D'autres méthodes pourraient être utilisées :

1. Définir une grille de 1 m x 1 m et tracer les lignes avec la souris.
2. Faire un « clic droit » pour obtenir des informations sur un nœud existant et modifier les coordonnées.

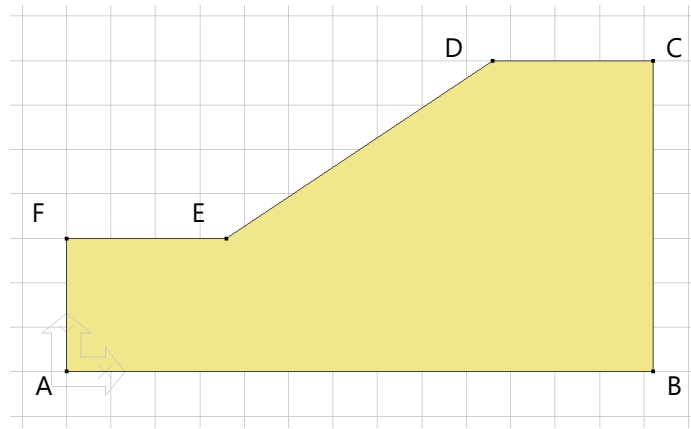


Figure 2: Géométrie de la construction

Définition des blocs :

Cette étape est facultative, mais elle facilite la reconnaissance des blocs si plus d'un a été généré.

1. Cliquer sur  **Propriétés des blocs**.
2. Cliquer droit sur la zone correspondant à la pente. Entrer **Sol** comme nom et **Appliquer**.



L'utilisateur peut afficher les noms des blocs sur la géométrie en utilisant le bouton  **Nom du bloc** sur la barre d'outils de l'espace de travail.

4.2. Maillage 2D

Définition de densité :

1. Aller dans l'onglet **Maillage** sur la barre de projet pour commencer à définir les intervalles le long des lignes.
2. Sélectionner tous les contours. Cliquer sur  **Découpage par distance** pour diviser les segments en longueurs fixes. Entrer 2 m dans le cadrant. Cliquer sur **Appliquer**.



L'algorithme du logiciel ajuste la longueur modélisée pour la meilleure correspondance possible avec la valeur de longueur renseignée.



Figure 3: Exemple de densité du maillage

Maillage :

1. Sélectionner les zones correspondant aux couches.
2. Cliquer sur l'outil **maillage régions surfaciques** . Choisir **Quadratique** comme type d'interpolation et **Triangle** pour la forme de l'élément
3. Cliquer sur **Appliquer** pour générer le maillage.

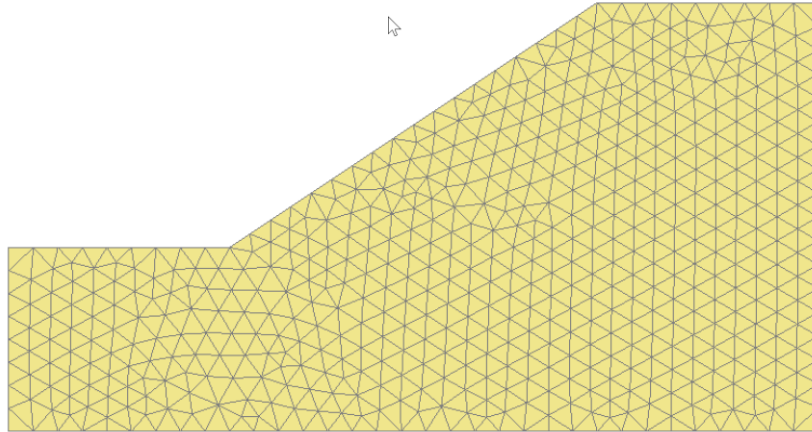


Figure 4: Exemple de maillage

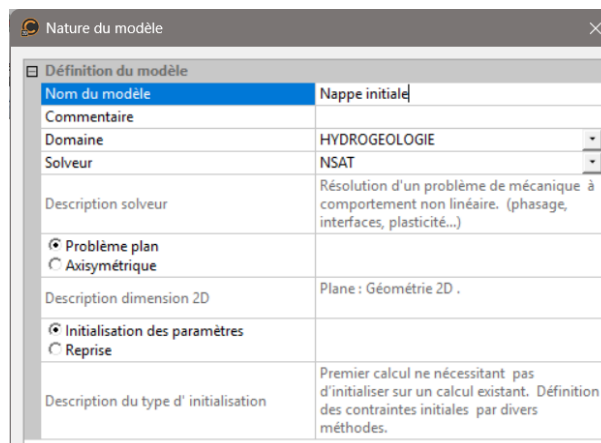


CESAR-LCPC propose 3 niveaux pour la procédure du maillage surfacique, donnant ainsi la possibilité de générer des mailles en transition plus ou moins dense. Le réglage s'effectue dans les **Préférences > Paramètres du programme** : interpolation linéaire = transition rapide et cubique = transition dense.

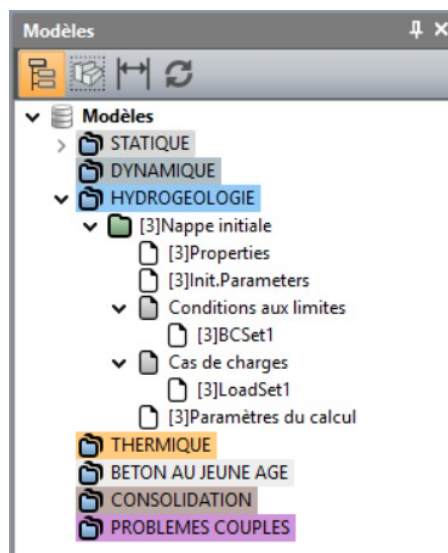
5. PROPRIETES DU CALCUL POUR DEFINIR LA POSITION DE NAPPE INITIALE

Définition du modèle :

1. Dans l'arborescence des modèles :
 - cliquer droit sur HYDROGEOLOGIE.
 - cliquer sur **Ajouter modèle**. Une nouvelle boîte de dialogue s'ouvre pour définir le modèle.
2. Entrer **Nappe initiale** comme "Nom du Modèle".
3. Sélectionner **NSAT** comme "Solveur".
4. Cocher **Problème Plan** comme configuration du modèle.
5. Cliquer sur **Valider**.



L'arborescence des modèles s'affiche alors ainsi :



Propriétés des matériaux des blocs surfaciques :

Nous définissons initialement les propriétés du matériau de l'étude dans l'onglet **PROPRIETES**.

1. Cliquer sur  Propriétés des blocs surfaciques.
2. Nommer l'ensemble de propriétés ("Pente" par exemple).
3. Dans **Paramètres d'écoulement**, sélectionner "Ecoulement en milieu poreux" et définir K_x , K_y , K_{xy} et C_e . Noter ici que C_e (coefficient d'accumulation) est fixé à zéro pour l'analyse en condition d'écoulement permanent.
4. Cliquer sur **Valider** puis **Fermer**.

	K_x (m/sec)	K_y (m/sec)	K_{xy} (m/sec)	C_e (1/m)
Pente	10^{-5}	10^{-5}	0	0

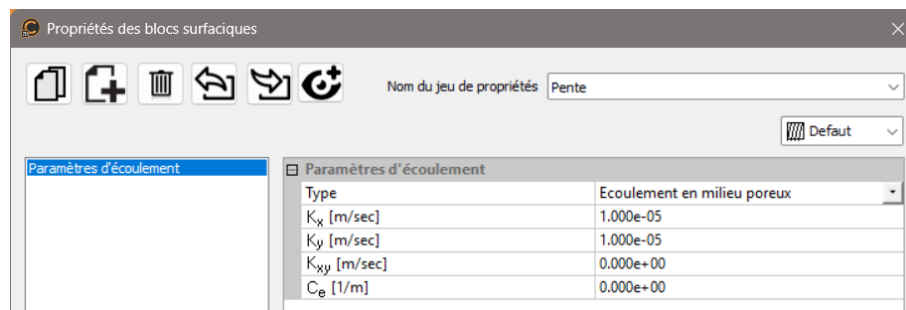


Figure 5: Définition des propriétés du matériau

Assignment des données :

Une fois les données créées, nous les assignons aux blocs du modèle.

1. Cliquer sur l'outil  Appliquer les propriétés.
2. Sur le côté gauche, une nouvelle fenêtre s'affiche. Cliquer sur Propriétés  **Propriétés des blocs surfaciques**
3. Sélectionner le bloc de la pente pour l'assigner au paramètre de la liste.
4. **Appliquer**.

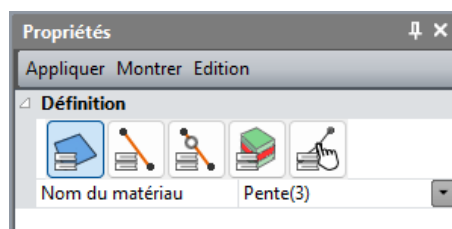


Figure 6: Outils pour assignment des propriétés

Conditions aux limites :

1. Aller à l'onglet **CONDITIONS LIMITES**.
2. Activer l'icône $\bar{h}$ Charge hydraulique constante. Définir une valeur de 32m à droite de la pente et une valeur de 15 m en pieds de pente (comme illustré sur la figure ci-dessous).
3. **Appliquer** pour chaque valeur de charge hydraulique

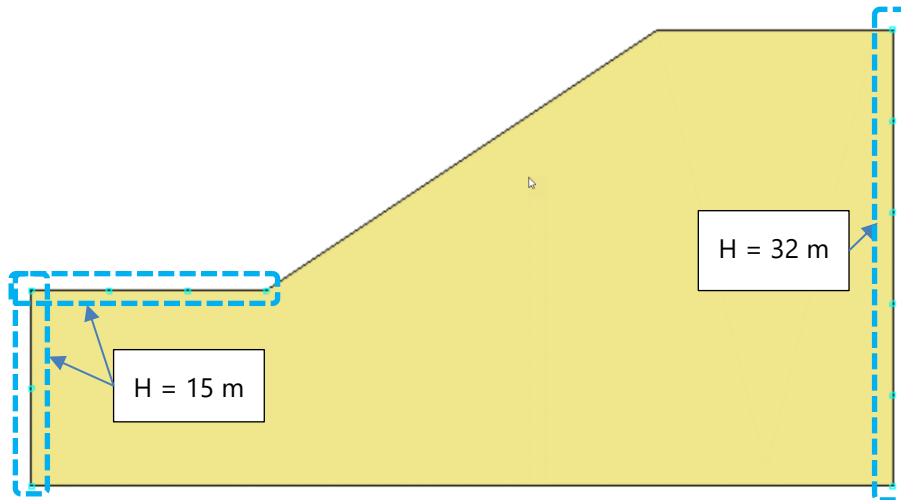


Figure 7: Charges hydrauliques appliquées



Facultatif. Il est possible de modifier le nom par défaut assigné aux conditions limites définies. Appuyer sur [F2] ; entrer par exemple **Charge hydraulique**.

Paramètres de calcul :

1. Dans l'onglet CALCUL, activer Paramètres du calcul .
2. Dans la section **Pas de temps**, sélectionner "Permanent".
3. Les autres paramètres sont définis avec leurs valeurs par défaut.
4. Cliquer sur **Valider** pour fermer.

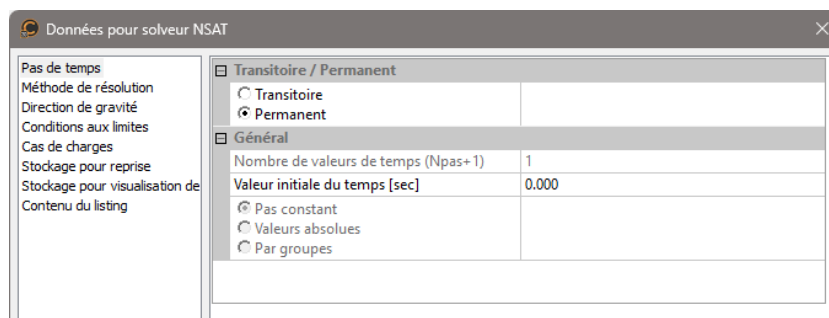


Figure 8: Définition des paramètres de calcul

6. PROPRIETES DE CALCUL POUR L'ANALYSE EN STABILITE

6.1. Initialisation de la pente

Définition du modèle :

1. Dans l'arborescence des modèles, faire un clic droit sur STATIQUE puis cliquer sur **Ajouter un modèle**.
2. Entrer **Initialisation de la pente** comme nom du "Modèle".
3. Sélectionner **MCNL** comme "Solveur".
4. Cocher **Déformation plane** comme type de configuration du modèle.
5. Cocher **Phasage**, nécessaire pour pouvoir ensuite définir une sous-phase « c-phi réduction ».
6. Cocher **Autres champs de contraintes initiales** pour initialiser la nappe avec l'option WTB.
7. Cliquer sur **Valider**.

Nature du modèle

Définition du modèle	
Nom du modèle	Initialisation de la pente
Commentaire	
Domaine	STATIQUE
Solveur	MCNL
Description solveur	Résolution d'un problème de mécanique à comportement non linéaire. (phasage, interfaces, plasticité...)
☒ Déformation plane ☐ Axisymétrique ☐ Contrainte plane	
Description dimension 2D	Déformation plane: suivant une direction principale du projet, les matériaux, forces et conditions limites sont constants. ATTENTION : considérant une tranche d'1 m de profondeur, penser à adapter les sections et propriétés des blocs 1D
☒ Phasage ☐ Initialisation des paramètres ☐ Reprise	
Description du type d'initialisation	Séquence de calculs enchainés. L'état de contraintes de la phase n-1 initialise l'état de contrainte de la phase n. Les champs de déplacements sont cumulés ou réinitialisés (réglage dans « Paramètres du calcul »).
Numéro de la phase	1
☒ Autre champ de contraintes initiales ☐ Contraintes géostatiques	
Type de contraintes initiales	L'initialisation du champs des contraintes est faite par un chargement gravitaire des sols secs (contraintes totales) ou saturés en fonction de la position de la nappe (contraintes effectives). D'autres options sont possibles.

Valider Annuler

Propriétés des matériaux pour les blocs surfaciques :

Nous définissons les propriétés du matériau de l'étude dans l'onglet **PROPRIETES**.

1. Cliquer sur  Propriétés des blocs surfaciques.
2. Nommer l'ensemble de propriétés ("Pente" par exemple).
3. Sous l'onglet **Paramètres élastiques**
 - Sélectionner "Elasticité linéaire isotrope" et définir ρ , E et ν .
 - Activer "Poreux" et renseigner ρ_{sat}
4. Sous **Paramètres plastiques**, sélectionner "Mohr-Coulomb sans écrouissage" et définir c , ϕ et ψ .
5. Cliquer sur **Valider** et **Fermer**.

	ρ (kg/m ³)	E (kN/m ²)	ν	c (kN/m ²)	ϕ (°)	ψ (°)
Pente	1882	10 000	0,3	42	15	0

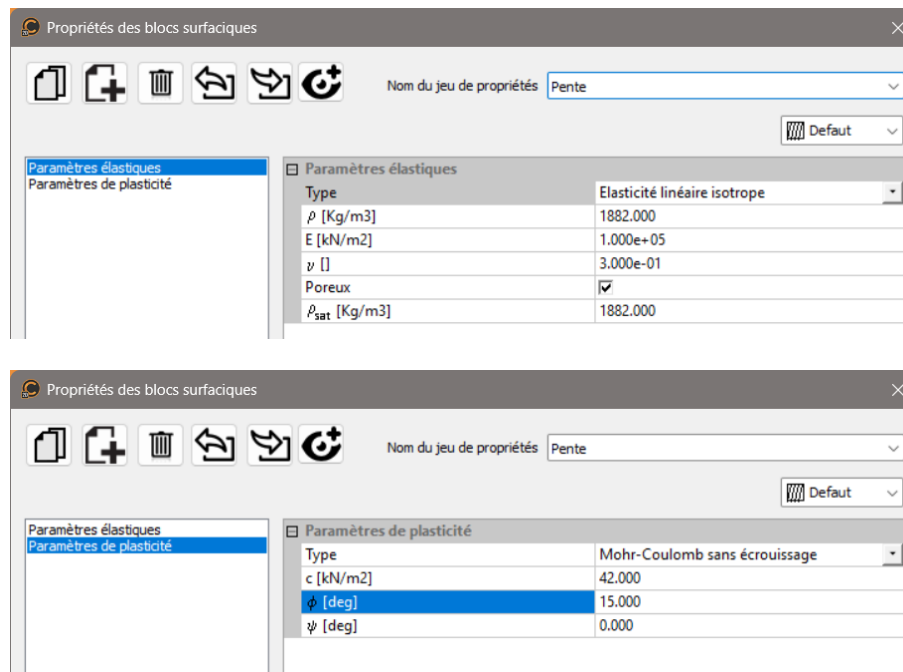


Figure 9: Définition des propriétés du matériau

Assignation des données :

Une fois les données créées nous les assignons aux blocs du modèle

1. Cliquer sur l'outil  **Appliquer les propriétés**.
2. A gauche, une nouvelle fenêtre s'affiche. Cliquer sur  **Propriétés des blocs surfaciques**.
3. Sélectionner le bloc de la pente sur le modèle pour l'assigner au paramètre de la liste.
4. **Appliquer**.

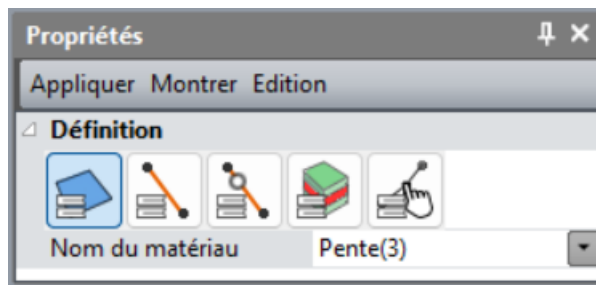


Figure 10: Outils pour assignation des propriétés

Conditions aux limites :

1. Aller à l'onglet **CONDITION LIMITES**.
2. Sur la barre d'outils, activer l'icône  pour définir les supports inférieurs et latéraux. Les supports sont automatiquement affectés aux limites de la maille.
3. Facultatif. Il est possible de modifier le nom par défaut assigné aux conditions limites. Appuyer sur [F2] ; entrer par exemple **Blocages standards**.

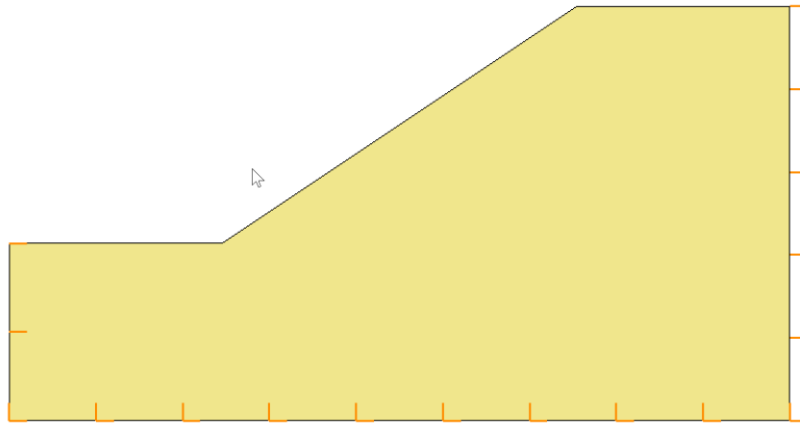


Figure 11: Affichage des conditions limites

Cas de chargement :

Nous définissons ici le champ hydrostatique à l'aide de la charge hydraulique calculée dans l'analyse du débit en régime permanent (calcul **Nappe initiale** précédent).

1. Aller à l'onglet **CHARGEMENTS**.
2. Activer  **WTB –Variation de la nappe**.
 - Sélectionner "Modèle" comme données de la Charge hydraulique initiale.
 - Sélectionner le modèle « Nappe initiale »- c'est le modèle précédemment défini. Un seul pas de temps est proposé par défaut car nous sommes en régime permanent.
 - **Valider**. L'activation du chargement est identifiable par la mention "WTB - Variation de la nappe - Ha (Modèle: Nappe initiale, Pas : 1)" affichée en bas à gauche sur l'espace de travail.

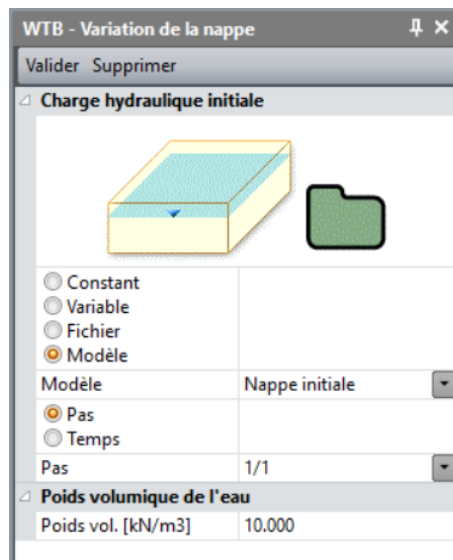


Figure 12: Définition de la nappe phréatique en écoulement permanent

Alternative pour définir la position de la nappe et le champ de contrainte correspondant :

Lorsque la ligne de surface libre est connue (la hauteur étant $p = 0$), l'utilisateur peut renseigner la valeur.

1. Aller à l'onglet **CHARGEMENT**.
2. Activer  **WTB -Variation de la nappe**.
 - Sélectionner "Variable" comme donnée pour la **Charge hydraulique**.
 - La nappe phréatique est définie par 5 points : (0 ; 15), (18 ; 15), (30 ; 23), (48 ; 29), (66 ; 32). Ces points peuvent être saisis dans la grille ou cliqués sur l'espace de travail avec l'option [P*], la grille s'affichant alors.
 - **Valider**.

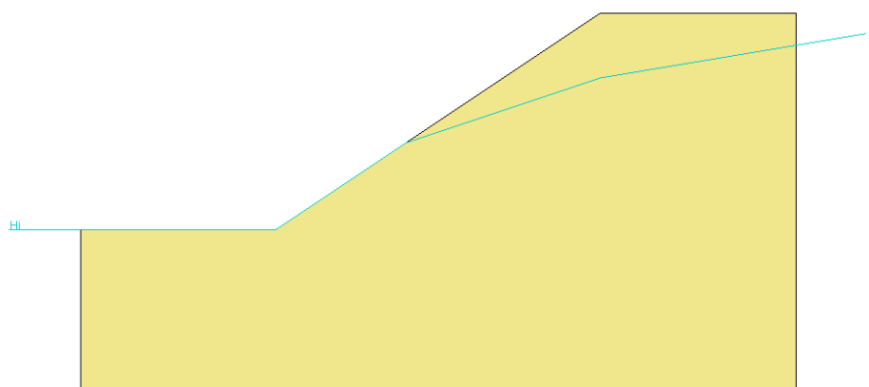
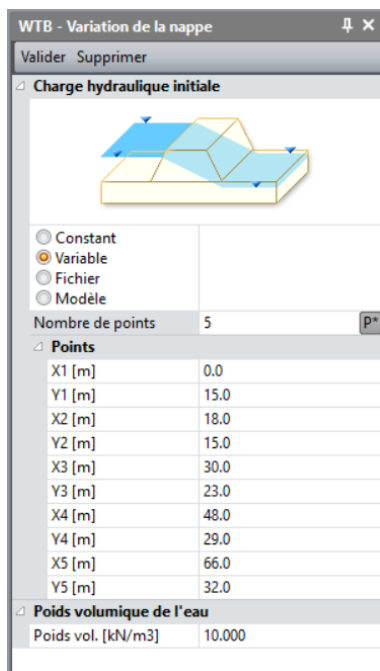


Figure 13: Alternative de définition de la nappe phréatique



L'utilisateur peut également définir des blocs sous la nappe qui seraient secs. Il activera alors l'option  **WTB – Blocs chargés.**, sélectionnera les blocs concernés et les déclarera comme inactifs.

Paramètres de calcul :

1. Dans l'onglet CALCULS, activer **Paramètres de calcul** .
2. Sous **Paramètre général**, entrer les valeurs suivantes :
 - Processus d'itération :
 - Nombre maximum d'incrément : 1
 - Nombre maximum d'itération par incrément : 1000
 - Tolérance : 0,001
 - Méthode de résolution : 1- contraintes initiales
 - Type de solveur : Pardiso
 - Stockage
 - Stockage des déformations : ☒
 - Stockage des déformations totales : ☒
3. **Valider** pour fermer.

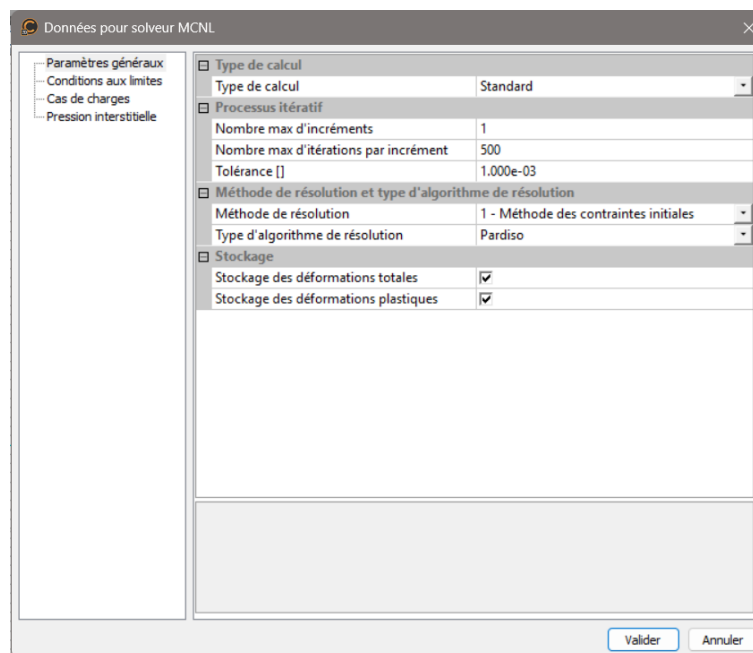


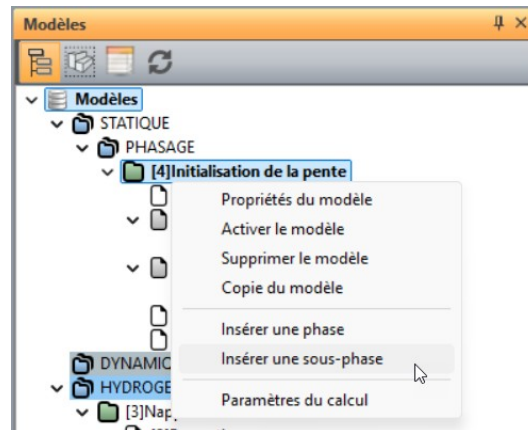
Figure 14: Définition des paramètres de calcul

6.2. Calcul du facteur de sécurité

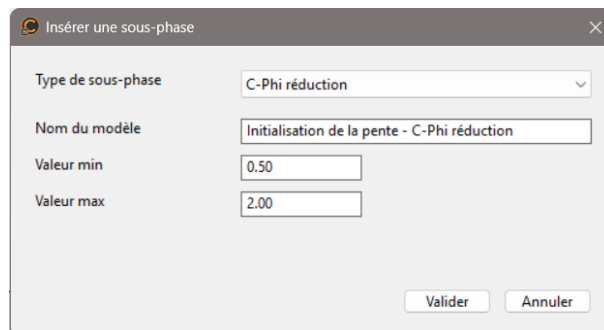
Ce calcul exploitant la méthode « c-phi réduction » va être une sous-phase du modèle précédent.

Définition du modèle :

1. Dans l'arborescence des modèles, cliquer droit le modèle précédent puis cliquer sur **insérer une sous-phase**.



2. Une fenêtre s'ouvre proposant :
 - le type de sous-phase : c-phi réduction ou facteurs de sécurité ;
 - le nom du modèle : le nom proposé par défaut peut être modifié ;
 - les valeurs minimales et maximales de l'intervalle de recherche du coefficient de sécurité ;
 - **Valider**.



Propriétés, conditions limites et chargements

Par défaut, les propriétés et conditions limites du modèle de référence seront copiées et partagées.

Il n'y a pas de chargement à appliquer car on recherche un état de stabilité limite par réduction des propriétés de cisaillement du sol.

Paramètres du calcul

Les paramètres de résolution du processus itératif sont automatiquement adaptés, mais l'utilisateur peut venir modifier la méthode de calcul proposée :

- Méthode 1 (standard, par défaut) :

- Méthode de résolution : contraintes initiales
- Nombre d'itérations : 500
- Précision : 0,001

- Méthode 2 (accélérée) :

- Méthode de résolution : contraintes initiales + méthode sécante
- Nombre d'itérations : 200
- Précision : 0,001

- Méthode 3 (personnalisée) :

- Méthode de résolution : « libre »
- Nombre d'itérations : « libre »
- Précision : « libre »

The screenshot shows a software window titled "Données pour solveur MCNL". On the left is a sidebar with a tree view containing "Paramètres généraux", "Conditions aux limites", "Cas de charges", and "Pression interstitielle". The main area is divided into several sections with expandable headers:

- Type de calcul**:
 - Type de calcul: C-Phi réduction
 - Détection de la non convergence: ☒
 - Valeur min []: 5.000e-01
 - Valeur max []: 2.000e+00
 - Précision []: 1.000e-02
 - Options pour la réduction c-phi: Standard (dropdown)
- Processus itératif**:
 - Nombre max d'incrément: 1
 - Nombre max d'itérations par incrément: 500
 - Tolérance []: 1.000e-03
- Méthode de résolution et type d'algorithme de résolution**:
 - Méthode de résolution: 1 - Méthode des contraintes initiales (dropdown)
 - Type d'algorithme de résolution: Pardiso
- Initialisation de déplacements**:
 - Initialisation de déplacements: ☒
- Stockage**:
 - Stockage des déformations totales: ☒
 - Stockage des déformations plastiques: ☒

At the bottom right are "Valider" and "Annuler" buttons.

Figure 15: Exemple de paramètres de calcul pour le réglage « standard »

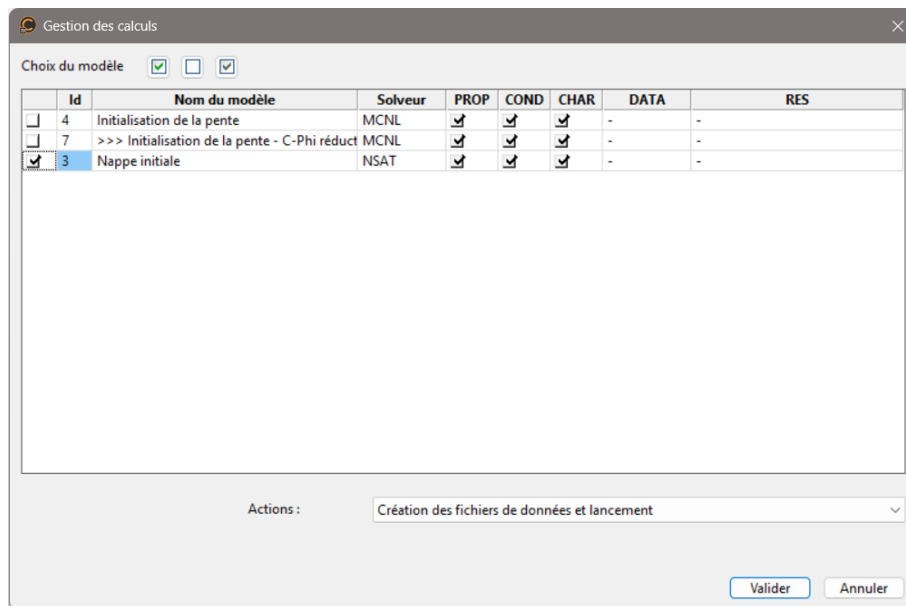
7. CALCULS

Les calculs mécaniques dépendent du résultat du calcul en écoulement si l'option WTB a été définie sur la base du modèle « Nappe initiale ».

Aussi il faut commencer par calculer ce modèle, puis passer au calcul des 2 modèles mécaniques.

Le calcul HYDRO est identifié dans la liste des calculs par la couleur bleue.

1. Aller à l'onglet **CALCULS**.
2. Cliquer sur  Gestion des calculs.
3. Sélectionner le modèle « Nappe initiale ».
4. Sélectionner Création des fichiers des données et lancement. Cliquer sur Valider.
5. Le processus d'itération s'affiche sur la **Fenêtre de travail**. Le message "Fin du calcul en mode EXEC" Indique la fin du processus



6. Cliquer sur  Gestion des calculs.
7. Sélectionner les 2 modèles « Initialisation de la pente » et « C-phi réduction ».
8. Sélectionner Création des fichiers des données et lancement. Cliquer sur Valider.
9. Le processus d'itération s'affiche sur la **Fenêtre de travail**. Le message "Fin du calcul en mode EXEC" Indique la fin du processus



CESAR-LCPC détecte si les modèles sont prêts pour l'analyse. Chacune des étapes doit être validée par une case cochée.



Tous les messages de l'analyse seront affichés dans une **Fenêtre sortie**. L'utilisateur devra prêter attention aux messages d'avertissement, car ces messages indiquent des anomalies potentielles dans l'analyse. Le résultat est enregistré au format binaire (*.rsv4) dans un dossier temporaire (.../TMP/), défini lors de la configuration. Les informations détaillées de l'analyse sont également enregistrées dans un fichier texte (*.list).

8. RESULTATS

8.1. Analyse des écoulements en régime permanent

Le résultat principal est le champ de charge hydraulique mais aussi la localisation de la surface libre (où la pression hydrostatique est nulle).

Affichage du champ de la charge hydraulique.

1. Aller à l'onglet **RESULTATS**.
2. Cliquer sur  **Isovaleur** pour afficher des isovaleurs.
3. Cliquer sur  **Type d'isovaleur** pour sélectionner le résultat à afficher.
 - Sélectionner **H**
 - Cliquer sur **Appliquer**.
4. Cliquer sur  **Options isovaleur**.
 - Sous *Options Isovaleurs*
 - o Activer
 - o Style : Zones
 - Sous *Lignes de contours*
 - o Activer
 - o Palette : Noir
 - Sous *Isovaleurs*
 - o Nombre de lignes : 10
 - o Palette de couleurs : Hydro
 - Cliquer sur **Appliquer**.
5. Cliquer sur  **Légende**.
 - Dans **Légendes**, sélectionner **Isovaleurs**
 - Cliquer sur **Appliquer**.

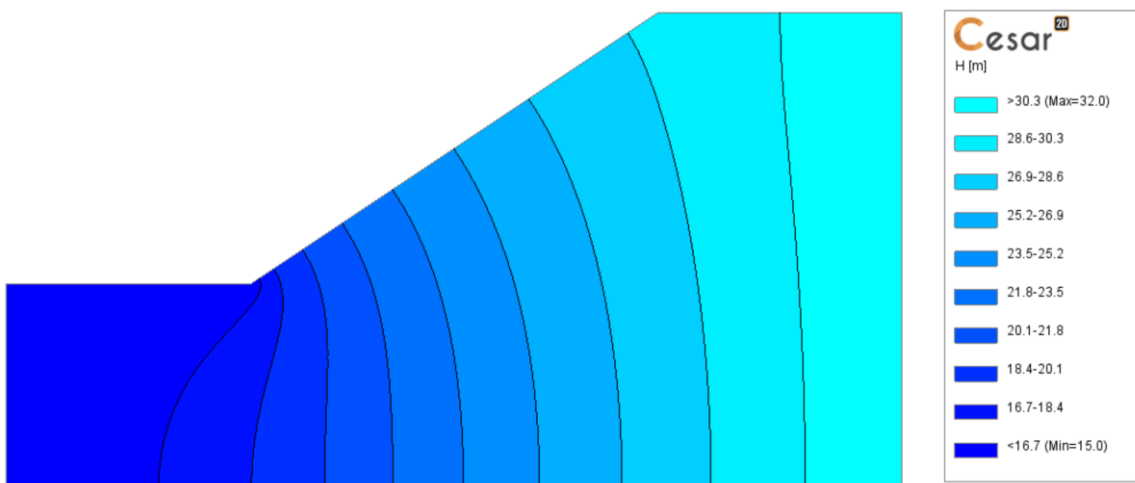


Figure 16: Affichage de la charge hydraulique H

Affichage de la surface libre (astuce).

1. Aller dans l'onglet **RESULTATS**.
2. Cliquer sur  **Type d'isovaleur** pour sélectionner le résultat à afficher.
 - Sélectionner **P**
 - Cliquer sur **Appliquer**.
3. Cliquer sur  **Options isovaleur**.
 - Sous *Options Isovaleurs*
 - o Désactiver
 - Sous *Lignes de contours*
 - o Activer
 - o Palette : Noir
 - Sous *Echelle*
 - o Sélectionner "Manuel"
 - o Définir "Valeur inf." à -0.001 MN/m^2
 - o Définir "Valeur sup." à 0.001 MN/m^2
 - Sous *Isovaleurs*
 - o Nombre de lignes : 4
 - o Palette de couleurs : Hydro
 - Cliquer sur **Appliquer**.
4. Cliquer sur  **Légende**.
 - Dans **Légende**, sélectionner **None**
 - Cliquer sur **Appliquer**.

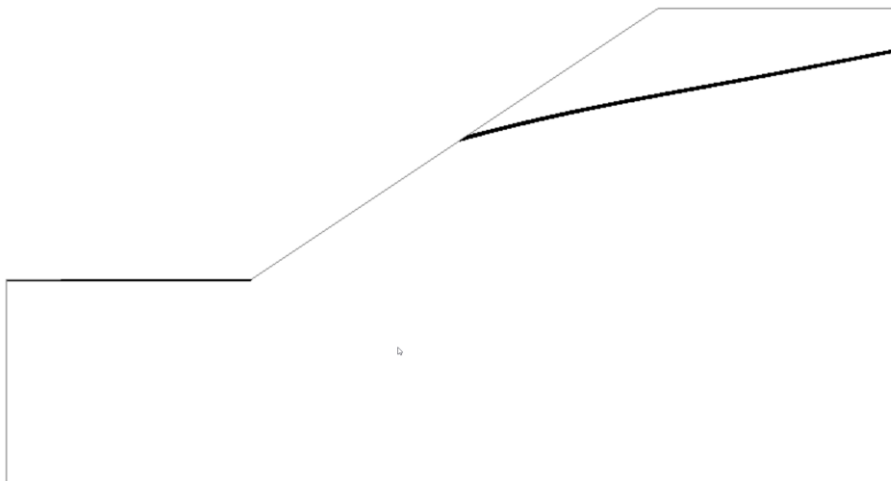


Figure 17: Affichage de la surface libre ($p = 0$)

8.2. Analyse de la Stabilité

Sélectionner le modèle **Initialisation de la pente – c-phi réduction**.

Le résultat principal est le facteur de sécurité. Il est affiché :

- Dans la Fenêtre de sortie,
- Dans l'édition du fichier listing,
- Sur l'espace d'affichage des résultats.

Le facteur de sécurité est 1,11.

Affichage du mécanisme de rupture dans la pente.

1. Aller à l'onglet **RESULTATS**.
2. Cliquer sur  **Isoleur** pour afficher des isovaleurs.
3. Cliquer sur  **Type d'isoleur** pour sélectionner le résultat à afficher.
 - Sélectionner **ϵ_1, t** , déformations totales
 - Cliquer sur **Appliquer**.
4. Cliquer sur  **Options isoleur**.
 - Sous **Options Isoleurs**
 - o Activer
 - o Style : Zones
 - Cliquer sur **Appliquer**.

L'image montre le mécanisme classique de rupture "circulaire" sur le maillage déformé.

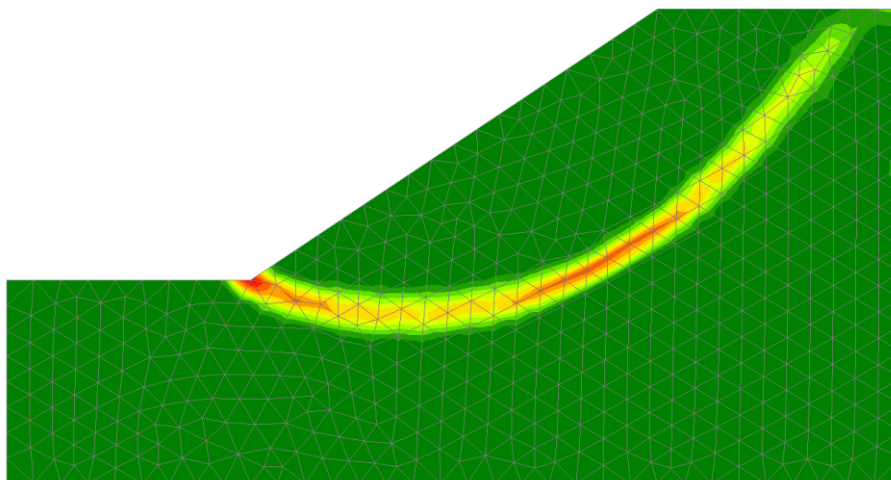


Figure 18: Déformations totales après c-phi réduction (réglages « standard »)

9. ANNEXE : FACTEURS D'INFLUENCE SUR LES RESULTATS

L'ensemble des résultats présentés à suivre conduisent tous au même facteur de sécurité de 1,1.

On présente l'influence de la méthode et de la précision du processus itératif puis l'influence du maillage.

9.1. Influence du processus itératif

Une variante au calcul précédent serait d'utiliser le réglage « accéléré ».

Dans ce cadre-là, les calculs sont plus rapides (22'' sur un Core i7 – 32 Go de RAM). Le coefficient de sécurité de 1,1 est atteint par contre le schéma de rupture n'est pas précis (cf. figure ci-dessous).

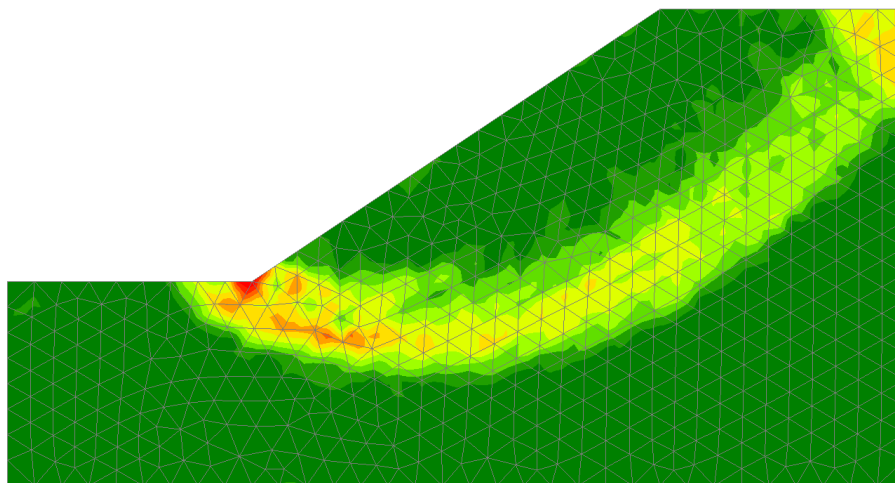


Figure 19: Déformations totales après c-phi réduction (réglages « accéléré »)

9.2. Influence du maillage

Le modèle précédent est recalculé mais sur la base d'un maillage plus dense : une densité de 0,5 m est appliquée (au lieu de 2 m).

Les 3 variantes de calcul précédent sont testées. Le réglage « personnalisé » est adapté de « standard » avec une précision de 1% au lieu de 0,1%.

Dans ce cadre-là, les temps de calculs diffèrent grandement : 2'37 '' pour le réglage « standard » contre 1'20'' pour les 2 autres procédures.

Le coefficient de sécurité de 1,1 est atteint par les 3 réglages ; de même le mode de rupture est correctement représenté pour les 3 réglages (cf. figure ci-dessous).

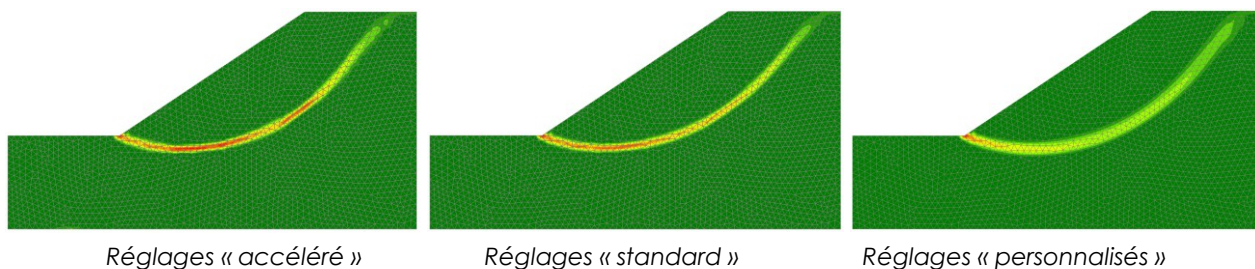


Figure 20: Déformations totales après c-phi réduction

Édité par :



8 quai Bir Hakeim

F-94410 SAINT-MAURICE

Tél. : +33 1 49 76 12 59

cesar-lcpc@itech-soft.com

www.cesar-lcpc.com