



## Tutoriel 2.05

# Capacité portante d'une fondation superficielle

| Ref: CESAR-TUT(2g-05)-v2025.0.1-FR



# 1. INTRODUCTION

Version utilisée : v2025.0.

## 1.1. Aperçu

Ce tutoriel s'appuie sur un exemple académique d'analyse de la capacité portante des semelles, détaillé dans « Undrained bearing capacity factors for conical footings on clay », G. T. Houlsby and C. M. Martin, Geotechnique 53, No. 5, 513–520, 2003.

La charge maximale supportée par les éléments de fondation superficielle, appelée capacité portante, est fonction de la cohésion et de l'angle de frottement des sols, ainsi que de la largeur  $B$  et de la forme de la fondation. Dans ce tutoriel, la fondation est une semelle circulaire rigide (diamètre  $B = 1$  m) reposant sur un sol homogène non drainé modélisé selon un critère de Tresca (cohésion non drainée  $c_u$ ).

CESAR facilite la conception des fondations superficielles. Avec la méthode des éléments finis, les tassements (analyse ELS) sont généralement les résultats attendus ; une méthode appropriée permet également d'obtenir la capacité portante et donc de réaliser une analyse ELU.

## 1.2. Objectifs du tutoriel

- Apprendre à concevoir un maillage
- Se familiariser avec le processus d'itération incrémentale pour des analyses non linéaires
- Déterminer le facteur de sécurité des forces
- Générer une analyse en contrôle de charge ou en contrôle de déplacement.
- Savoir utiliser les outils de post traitement

## 1.3. Spécifications du problème

### Hypothèses générales

- Analyse statique,
- Comportement non linéaire du sol,
- Problème asymétrique, on ne peut modéliser et analyser qu'une section de la fondation.

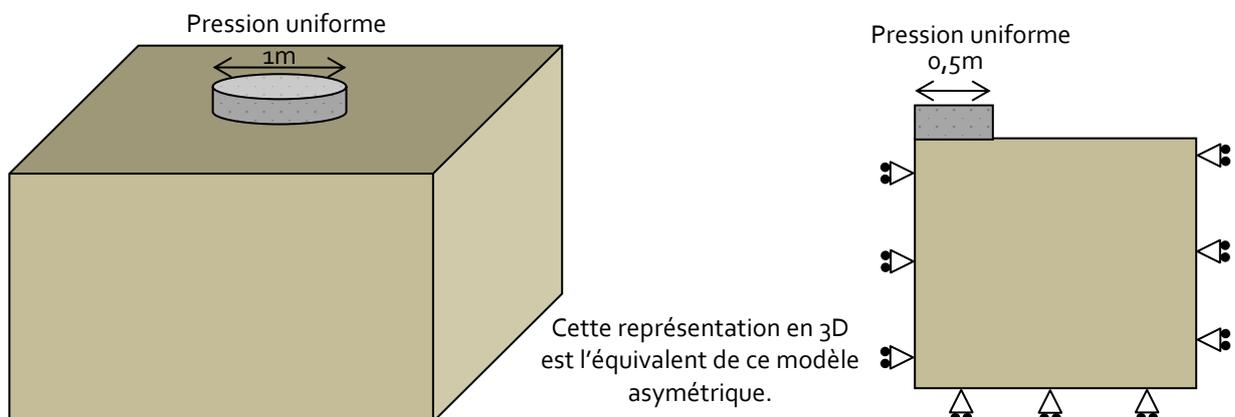


Figure 1: Contexte

## Propriétés des matériaux

L'article de référence considère un sol avec un comportement plastique selon le critère de Tresca.

	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_u$ (MPa)	$\nu$	$c_u$ (kPa)	$\varphi_u$ (°)	$K_o$
Poids du sol	20	50	0.45	20	0	0.5

## 2. GEOMETRIE ET MAILLAGE

### 2.1. Réglages généraux

1. Démarrer CESAR 2D.
2. Définir les unités  (**Unités**), situé en haut à gauche :
  - Dans la fenêtre, sélectionner l'option **Général/Longueur** et choisir **m** comme unité dans le déroulé de la deuxième colonne du cadre à gauche.
  - Sélectionner, l'option **Mécanique/Force** et choisir kN comme unité.
  - Sélectionner, l'option **Mécanique/Déplacement** et choisir **mm** comme unité.
  - Cliquer ensuite sur **Valider**.
3. Dans l'onglet  **Plan de travail**, définir la grille à 1m (dX = dY = 1m)



Utiliser "Enregistrer par défaut" afin de définir ce système d'unité comme environnement principal d'utilisation.

### 2.2. Géométrie

Un nouveau projet, commence toujours dans l'onglet **GEOMETRIE**.

#### Dessiner la géométrie :

1. Cliquer sur  . La fenêtre de dialogue **Points** apparaît.
2. Entrer les coordonnées '**0, 0**' pour X et Y, et cliquer sur **Appliquer**.
3. Cocher la case "Points liés" pour générer automatiquement un segment entre deux points.
4. Entrer les coordonnées '**0.5, 0**', et appuyer sur **Appliquer**. Le Segment A est alors créé.
5. Entrer les coordonnées '**6, 0**', et appuyer sur **Appliquer**. Le Segment B est alors créé.
6. Entrer les coordonnées '**6, -10**', et appuyer sur **Appliquer**. Le Segment C est alors créé.
7. Entrer les coordonnées '**0, -10**', et appuyer sur **Appliquer**. Le Segment D est alors créé.
8. Entrer les coordonnées '**0, 0**', et appuyer sur **Appliquer**. Le Segment E est alors créé.



D'autres méthodes peuvent être utilisées :

1. Définir les dimensions de la grille d'1m x 1m et tracer ensuite les lignes avec la souris.
2. Faire un "clic droit" pour obtenir des informations sur des points existants et modifier leurs coordonnées.

## 2.3. Maillage 2D

### Densité du maillage

- 💡 Définir les divisions denses dans les zones à fortes contraintes, c-à-d sous la fondation chargée. Utiliser une définition progressive de la densité pour générer une évolution progressive des petits aux grands segments sur les extrémités.

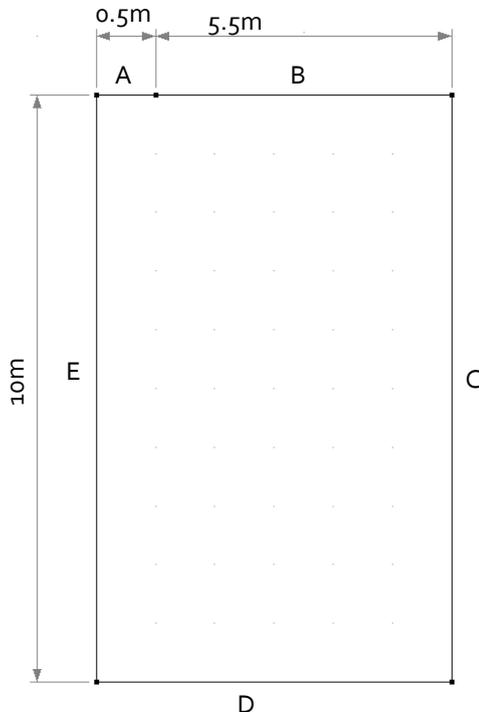


Figure 2: Géométrie

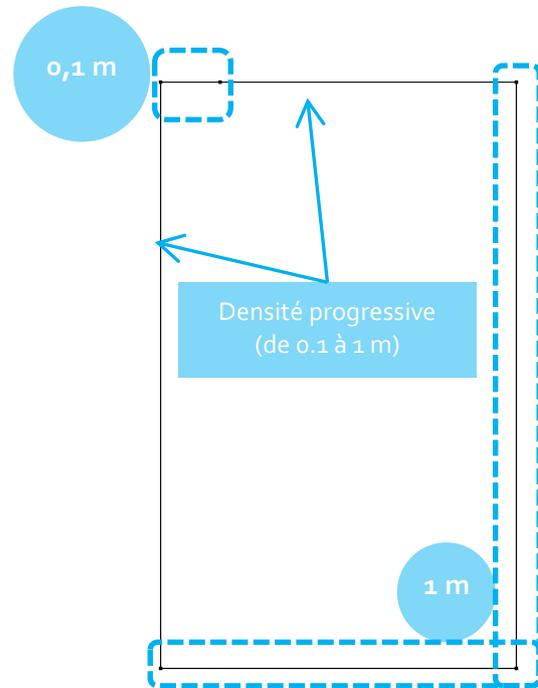


Figure 3: Densité de maillage

1. Aller dans l'onglet MAILLAGE sur la barre de projet pour commencer à définir les intervalles le long des lignes.
2. Sélectionner le bord A. Cliquer sur  **Découpage par distance** pour découper le segment en longueur d'intervalle fixe. Entrer la longueur **0,1 m** dans le cadrant. Cliquer sur **Appliquer**.
3. Sélectionner les segments C et D. Cliquer sur  **Découpage par distance** pour découper le segment en intervalles fixes. Entrer la longueur **1 m**. Cliquer sur **Appliquer**.
4. Cliquer sur  **Découpage variable** pour découper le segment en longueur variable. Cocher Premier intervalle et dernier intervalle pour définir la méthode dans le cadrant **Découpage variable**. Entrer la longueur **0.1 m** comme **Premier intervalle** et **1 m** comme **dernier intervalle**.
  - Cliquer sur le segment B à proximité de la fondation. La division étant interactive, ce premier clic définit la position de la première division.
  - Répéter l'opération précédente en cliquant sur l'arête E près de la fondation.

- ⚠ L'algorithme du logiciel ajuste la longueur modélisée pour une meilleure synchronisation avec la valeur de la longueur rentrée.

## Maillage :

1. Cliquer sur l'onglet **maillage régions surfaciques** .
  - Choisir **Quadrangulaire** comme type d'interpolation.
  - Choisir **Triangle** pour la forme d'élément.
2. Cliquer sur **Appliquer** pour générer le maillage.

 CESAR-LCPC propose 3 niveaux pour la procédure du maillage surfacique, donnant ainsi la possibilité de générer des mailles denses. On peut ajuster ce niveau dans les **Préférences>Paramètres du programme** : linéaire = lâche et cubique=dense.

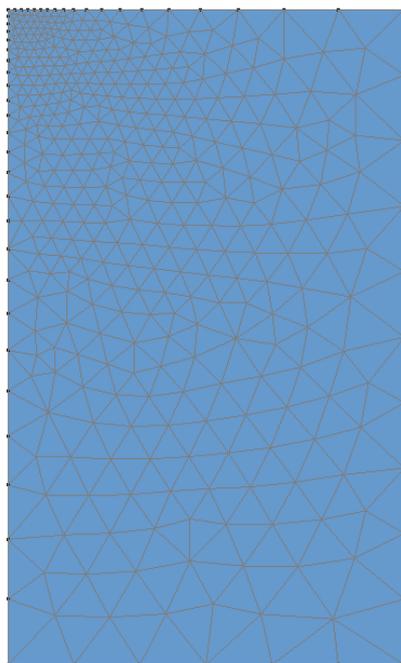


Figure 4: Exemple d'une maillage

### 3. RECHERCHE DU FACTEUR DE SECURITE

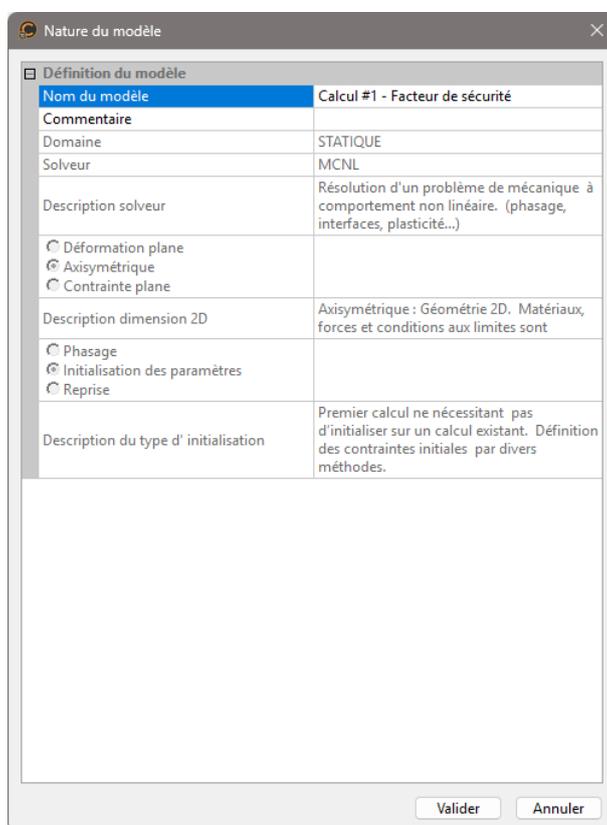
#### 3.1. Edition du modèle

Définition du modèle :

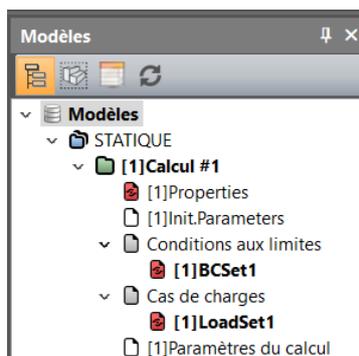
1. Faire un clic droit, sur **STATIQUE** dans l'arborescence sur le côté droit de l'espace de travail.
2. Cliquer sur **Ajouter un modèle**.
3. Une nouvelle fenêtre de définition du modèle apparaît sur :
  - Entrer *Calcul #1 – Facteur de sécurité* comme "Nom du modèle",
  - Cocher **Axisymétrie** comme configuration du modèle et **Initialisation des paramètres** comme type de calcul,
  - Cliquer sur **Valider**.



Se référer au chapitre "Champ de contraintes initiales" dans le document "Démarrer avec CESAR-LCPC"



A présent, l'arborescence est illustrée comme ceci :



### Propriétés des matériaux :

Nous commençons par définir le matériau pour l'étude.

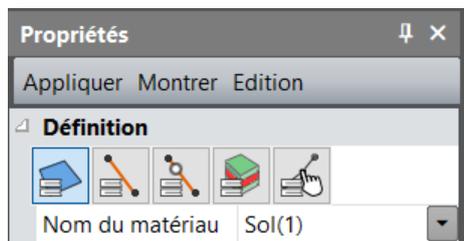
1. Cliquer sur  **Propriétés des blocs surfaciques.**
2. Nommer le jeu de propriétés : (Exemple "Sol").
3. Dans les paramètres d'élasticité, choisir "Elasticité linéaire isotrope" et définir  $\rho$ , E and  $\nu$ .
4. Dans les paramètres de plasticité, choisir "Mohr-Coulomb sans écrouissage" et définir  $c$ ,  $\varphi$  and  $\psi$ .
5. Cliquer sur **Valider** and **Fermer**.

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (MN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	$C_u$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\varphi$ (°)	$\psi$ (°)
Masse du sol	2000	50	0.45	0.02	0	0

### Assignation des données :

Après définition des données, nous les assignons aux différents modèles des blocs.

1. Cliquer sur l'onglet  **Appliquer les propriétés.**
2. A gauche, une nouvelle fenêtre est affichée. Cliquer sur  **Propriétés des blocs surfaciques.**
3. Sélectionner le sol et les paramètres dans le déroulé.
4. **Appliquer.**



### Champ de contrainte initiale :

Le champ de contraintes initiales est considéré comme un champ de contraintes géostatiques existant ; la contrainte verticale est liée à la contrainte horizontale par la valeur du coefficient  $K_0$ .

1. Aller à l'onglet **INITIALISATION DES PARAMETRES.**
2. Sélectionner l'icône  **Contraintes Géostatiques.**
3. Cliquer sur **Insérer** pour définir une nouvelle couche.
4. Entrer les valeurs suivantes :

Altitude (m)	Poids Volumique (KN/m <sup>3</sup> )	$K_{0,x}$
0	20	0.5

5. **Valider.**

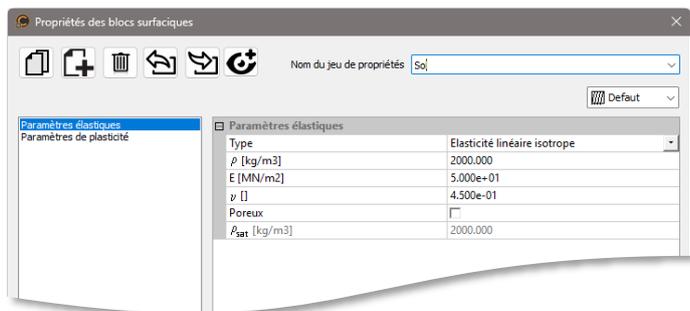


Figure 5: Fenêtre pour assignation des propriétés

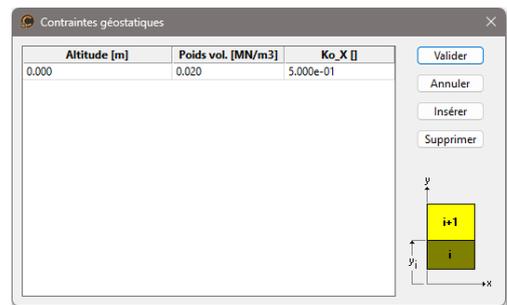


Figure 6: Fenêtre des données de contraintes géostatiques.

### Conditions limites :

1. Aller à l'onglet **CONDITIONS LIMITES**.
2. Activer l'icône  **Blocage latéral et inférieur** pour définir les supports inférieurs et latéraux.
3. Cliquer sur **Appliquer**. Les supports sont automatiquement affectés aux limites de la maille.



BCSet 1 est le nom par défaut attribué aux données des conditions limites. Il peut être édité en utilisant la touche [F2] du clavier.



Il est possible de définir plusieurs séries de conditions limites. Faire un clic droit sur **Conditions limites**, dans l'arborescence, pour en générer d'autres.

### Chargement :

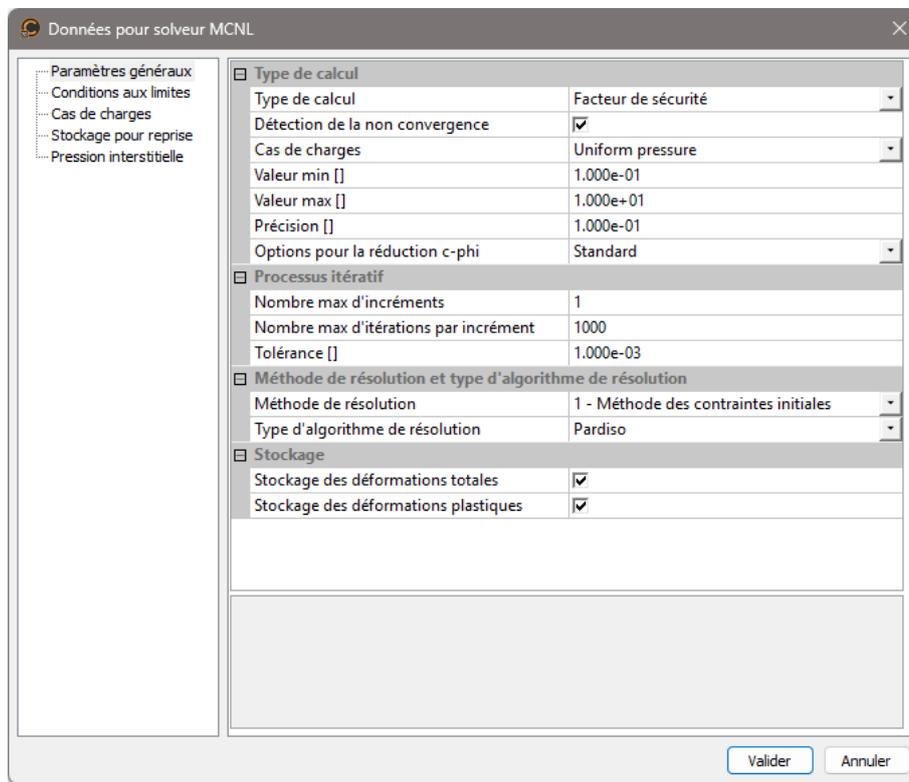
1. Aller dans l'onglet **CHARGEMENT**.
2. Activer l'icône  **Pression répartie**.
  - Cocher la case "Pression uniforme".
  - Entrer la valeur 0,120 MN/m.
3. Sélectionner le segment A.
4. Cliquer sur **Appliquer**.



Figure 7: Représentation de la pression uniforme

### Paramètres des calculs :

1. Dans l'arborescence, faire un clic droit sur **Paramètres du calcul**.
2. Dans la section des **Paramètres généraux**, entrer les valeurs suivantes :
  - Type de calcul : Facteur de sécurité  
Cocher " Détection de la non convergence"  
Définir la "Valeur minimum" à 0.1  
Définir la "Valeur maximum" à 10  
Définir la précision à 0.1
  - Processus itératif :  
Nombre max d'incrément : 1  
Nombre max d'itérations par incrément : 1000  
Tolérance : 0.001
  - Méthode de résolution : 1- Method de contraintes initiales
  - Type d'algorithme de résolution : Pardiso
3. Cliquer sur **Valider**

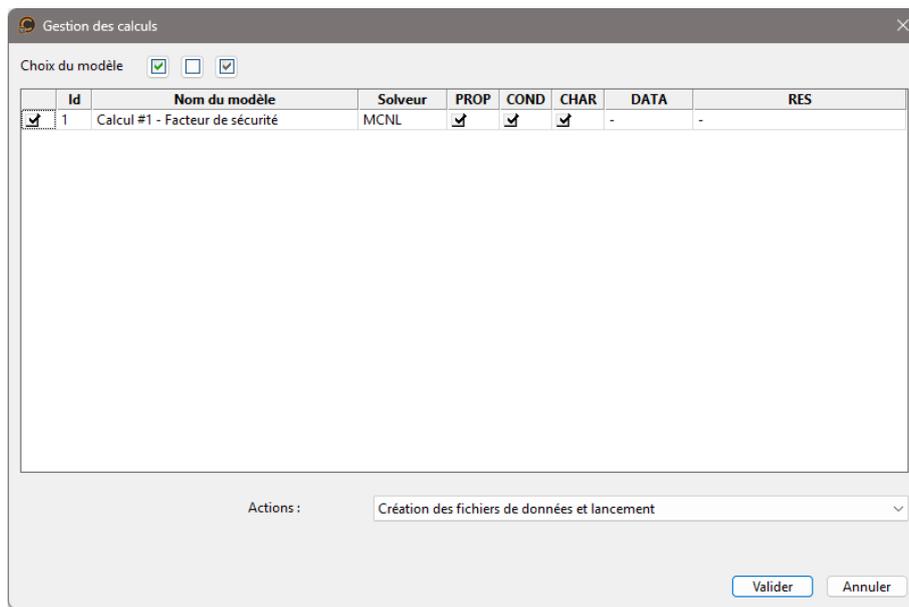


### 3.2. Résoudre

1. Aller dans l'onglet **GESTION DES CALCULS**.
2. Cliquer sur l'icône  **Gestion des calculs**.
3. Sélectionner le modèle
4. Sélectionner **Création des fichiers de 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 itératif.

 Le calcul prend quelques minutes, selon la configuration de l'ordinateur.

 CESAR-LCPC détecte si les modèles sont prêts pour l'analyse. Chacune des étapes doivent être validées par une case cochée (cf. ci-dessous).



 Toutes les informations sur le calcul s'affichent sur la fenêtre de travail durant l'analyse. Une prise en compte des messages d'erreurs est très importante, car ces messages peuvent indiquer que les résultats des analyses sont incorrects. Les résultats sont sauvegardés dans un fichier en format binaire (\*.RSV4) dans un dossier temporaire (.../TMP/), défini lors du paramétrage. Le détail d'information de l'analyse est également sauvegardé dans un fichier en format texte ASCII (\*.LIST).

### 3.3. Résultats

Le résultat obtenu est le facteur de sécurité. Il est représenté :

- Dans la fenêtre du projet,
- A la fin du listing du calcul.

Selon l'article référence, la capacité portante ultime pour la semelle considérée dans ce problème est :

$$p = 5.69 \times C_u = 113.8 \text{ kPa}$$

Le facteur de sécurité calculé est 0,95. Ainsi, la pression limite obtenue est de 114 kPa, ce qui est très proche de la valeur théorique qui est de 113,8 kPa.

#### Affichage du tracé scalaire des déformations plastiques

1. Cliquer sur RESULTATS
2. Cliquer sur  **Types de résultats**
  - Sélectionner le maillage **Non déformé**,
  - Cocher la case "Actif" et sélectionner la **Norme de la déformation plastique** dans le déroulé des paramètres,
  - Cliquer sur **Appliquer**.
3. Cliquer sur  **Options Isovaleurs**.
  - Cocher la case "Activer" et sélectionner Zones comme *style*,
  - Cocher la case "lignes de contours" et sélectionner le **Gris** dans le déroulé de palette,
  - Appliquer.
4. Cliquer sur  **Légende**.
  - Sélectionner **Isovaleur** comme *Légende*,
  - Appliquer.

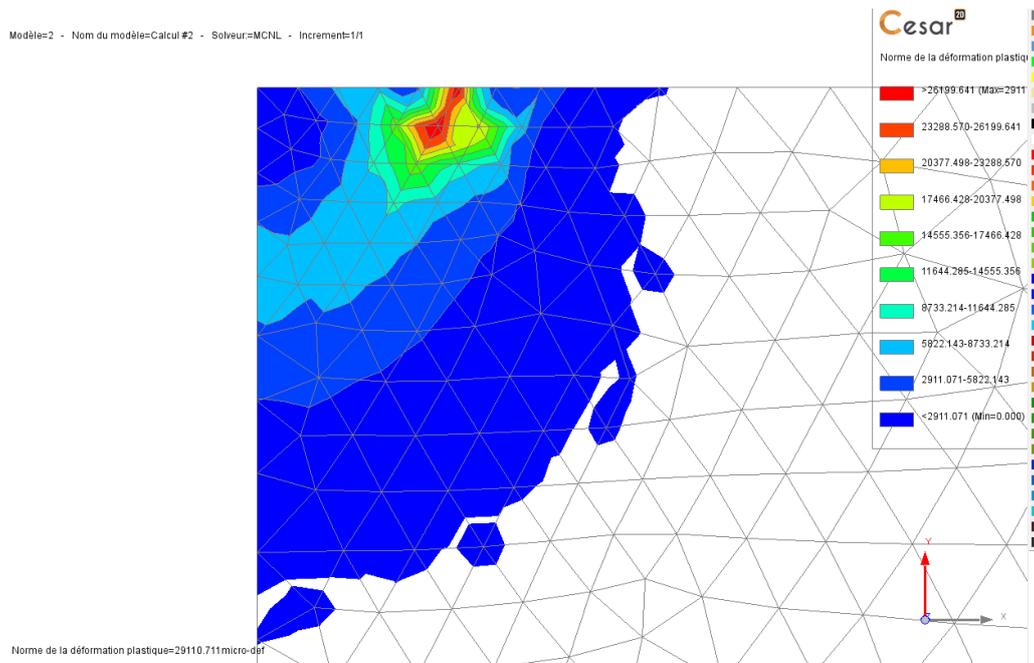


Figure 8: Vue du champ de déformations plastiques

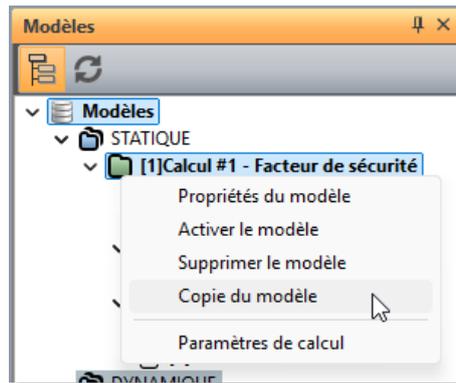
## 4. AUTRES TYPES DE CALCUL POUR DETERMINER LA PRESSION LIMITE

### 4.1. Analyse en charge contrôlée

Cette analyse est similaire à la précédente, la seule différence est que le processus des n'est pas automatique mais plutôt défini par l'utilisateur.

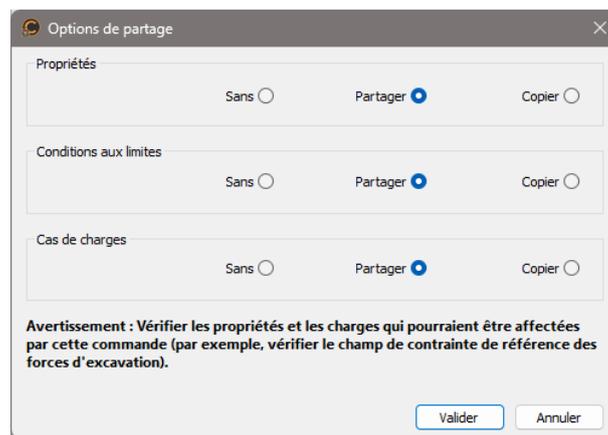
Définition du modèle :

1. Dans *L'ARBORESCENCE*, faire un clic droit sur **Calcul #1** puis cliquer sur **Copie du modèle**.



2. Définir le type de modèle :
  - Entrer Calcul #2 – Charge imposée.
  - Sélectionner *Initialisation des paramètres* comme type de calcul.
  - **Valider**.
3. Partager les **Propriétés**, les **Conditions aux limites** et les **Cas de charges**. Ensuite, **Valider**.

 Ainsi toute modification se mettra automatiquement à jour dans chacun des modèles.



Propriétés des matériaux :

Aucun changement.

Champ de contraintes Initiales :

Aucun changement.

### Conditions limites :

Aucun changement.

### Cas de charges

Aucun changement.

### Paramètres du calcul :

1. Faire un clic droit, sur **Calcul #2** dans **L'ARBORESCENCE**, et activer and **Paramètres du calcul**.
2. Dans les **Paramètres généraux** :

– Type de calcul :	Standard
– Processus itératif :	
Nombre max d'incrément :	12
Nombre max d'itérations par incrément :	1000
Tolérance :	0,001
– Méthode de résolution :	1- Méthodes des contraintes initiales
– Type d'algorithme :	Pardiso
3. Valider en cliquant sur **Entrer**.



Dans la fenêtre de définition des données, le programme définit automatiquement le facteur à 1 (valeur par défaut), divisée par 12 (le nombre d'incrément). Par conséquent, on obtient 12 fractions de 120kPa comme contrainte de pression.

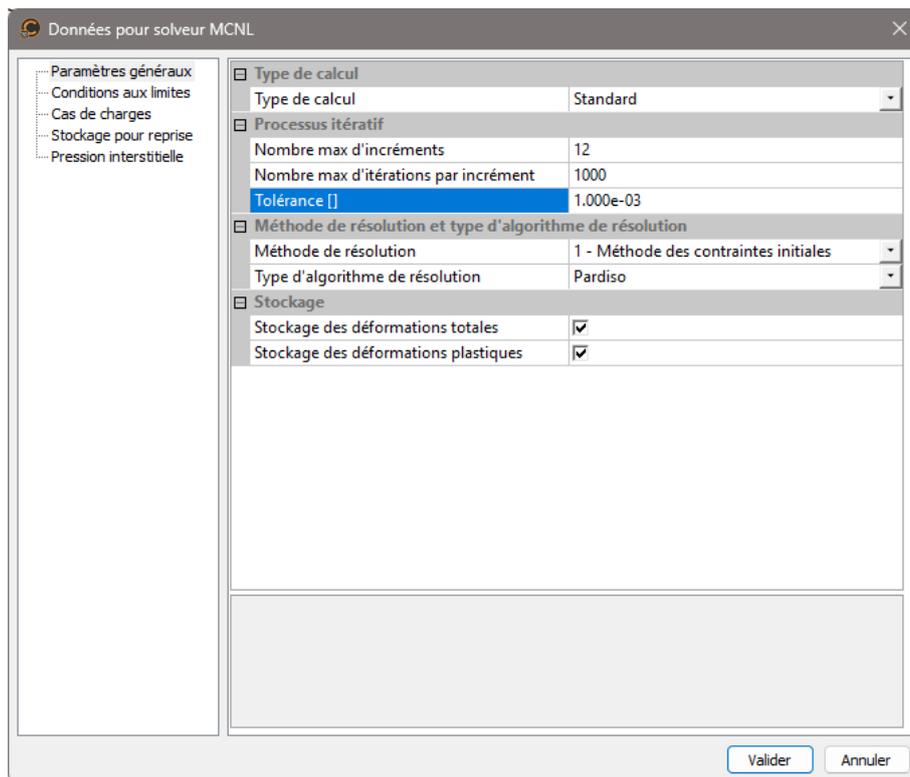


Figure 9: Fenêtre des paramètres du calcul

## Résoudre :

Maintenant que toutes les données sont définies, aller dans l'onglet **GESTION DES CALCULS**.

1. Cliquer sur  **Gestions des calculs**.
2. Sélectionner le modèle **Calcul #2 – Charge imposée**.
3. Sélectionner **Création des fichiers de données et lancement**.
4. **Valider**.



Toutes les informations sur le calcul s'affichent sur la fenêtre de travail durant l'analyse. Une prise en compte des messages d'erreurs est très importante, car ces messages peuvent indiquer que les résultats des analyses sont incorrects. Les résultats sont sauvegardés dans un fichier en format binaire (\*.RSV4) dans un dossier temporaire (.../TMP/), défini lors du paramétrage. Le détail d'information de l'analyse est également sauvegardé dans un fichier en format text (\*.LIST).

## Résultats

Le processus de calcul est affiché :

- Dans la fenêtre de projet,
- A la fin de la liste de calcul.

Le calcul s'est arrêté à l'incrément #12, car les critères de convergence n'ont pas été vérifiés jusqu'au nombre maximal d'itérations (1000). Cela signifie qu'on atteint la rupture du massif au 12ème incrément de charge.

```
Iteration no 999  Indicateur de convergence (residu) = 0.10927E+00
Iteration no 1000 Indicateur de convergence (residu) = 0.10925E+00

Temps CPU pour l'incrément 12 ( 1001 iter.)      : 58.04 secondes
Temps CPU pour preparation sorties                : 0.62 secondes

*****
CESAR a reconstitue un fichier maillage binaire
*****

**** Arrêt pour NON CONVERGENCE ****

STOP in EXMCNL, IERRCS = 200

-----
FIN du calcul en mode EXEC
-----
```

Figure 10: Extrait de la liste de l'analyse à la fin du calcul

La dernière valeur de la charge appliquée, vérifiée à l'équilibre est  $11/12 \times 120 \text{ kPa} = 110 \text{ kPa}$ .

La valeur de la pression limite se situe donc entre 110 kPa and 120 kPa.

Noter qu'on obtiendra une meilleure précision en augmentant le nombre d'incréments ou en définissant des incréments de charges plus petits entre 100 et 120 kPa.

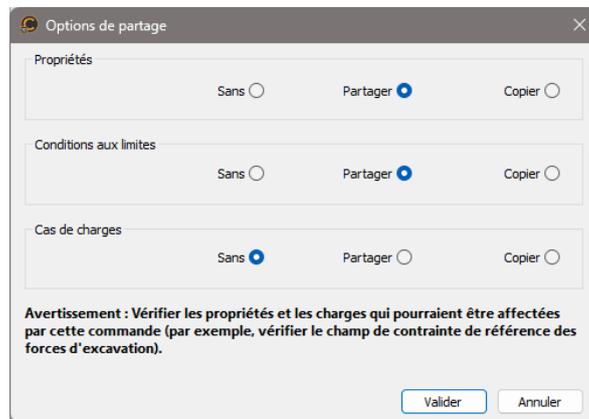
## 4.2. Analyse en déplacements imposés



Cette analyse est similaire à la précédente, seuls les cas de charge et les conditions aux limites sont modifiés.

### Définition du modèle :

1. Dans **L'ARBORESCENCE**, faire un clic droit sur **Calcul #2** puis cliquer sur **Copie du modèle**.
2. Définir le type de modèle :
  - Entrer **Calcul #3 – Déplacement imposé** comme nom.
  - Sélectionner **Initialisation des paramètres** comme type de calcul.
  - **Valider**.
3. Partager les **Propriétés** et les **Conditions aux limites**. Ne pas partager les **Cas de charges**.  
**Valider**.



### Propriétés des matériaux :

Aucun changement.

### Champ de contrainte initial :

Aucun changement.

### Conditions aux limites :

Les déplacements imposés sont considérés dans un nouveau cas de conditions aux limites. Il n'y a pas de changement des support standards aux limites du modèle.

1. Dans **L'ARBORESCENCE**, faire un clic droit sur **Condition aux limites** et cliquer sur **Ajouter un cas de conditions aux limites**.
  - Nommer le "Déplacement imposé"
  - **Valider**.
2. Cliquer sur  **Définition générale**.
  - Cocher la case **V imposé**.
  - Entrer la valeur **-40 mm**.
  - Sélectionner le segment A.
  - **Appliquer**.

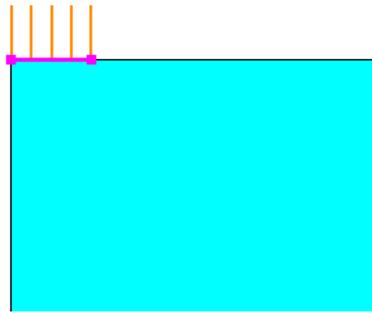
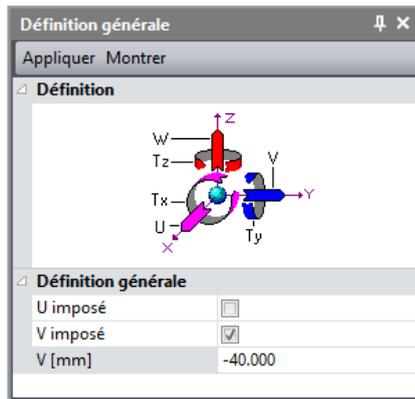


Figure 11: Vue de l'interface du logiciel après application du déplacement imposé

### Cas de charges :

Aucun chargement.

### Paramètres du calcul :

1. Faire un clic droit, sur **Calcul #3** dans **L'ARBORESCENCE**, et activer and **Paramètres du calcul** :
2. Dans les **Paramètres généraux** :
 

– Type de calcul :	Standard
– Processus itératif :	
Nombre max d'incrément :	20
Nombre max d'itérations par incrément :	1000
Tolérance :	0,001
– Méthode de résolution :	1- Méthodes des contraintes initiales
– Type d'algorithme :	Pardiso
3. Valider en cliquant sur **Entrer**.



Dans l'onglet **Conditions limites**, le programme définit automatiquement le facteur à 1 (valeur par défaut), divisée par 20 (le nombre d'incrément). Par conséquent, on obtient 20 fractions de 40mm comme étapes déplacements.

### Résoudre :

Maintenant que toutes les données sont définies, aller dans l'onglet **GESTIONS DES CALCULS**.

1. Cliquer sur  **Gestion des calculs**.
2. Sélectionner le modèle **Calcul #3 – Déplacement imposé**.
3. Sélectionner **Création des fichiers de données et lancement**.
4. Cliquer sur **Valider**.

### 4.3. Résultats

En chargement contrôlé, la convergence n'a pas été obtenue à la 12<sup>ème</sup> étape d'incrément. Cela montre que le sol est en rupture. La valeur de la pression limite se trouve donc entre 110 kPa et 120 kPa.

On peut également tracer la courbe de chargement illustrant l'évolution du tassement en fonction de la charge appliquée.

1. Aller à l'onglet **COURBES**.
2. Activer  **Points**.
  - Sélectionner le point aux coordonnées (0; 0) (celles par défaut)
  - Donner le nom "Centre"
  - **Appliquer**.
3. Activer  **Ensemble de points**:
  - Sélectionner le point "Centre"
  - Entrer le nom "Groupe 1"
  - Cliquer sur **Ajouter**.
4. Activer  **Graphiques paramétriques**.
  - Sélectionner **|u|** en abscisse,
  - Sélectionner  **$\sigma_{yy}$**  en ordonnée,
  - Cliquer sur **Appliquer**.
  - Cliquer  pour inverser l'orientation de l'axe des ordonnées.

On notera que la dernière valeur de déplacement n'est pas à considérer car obtenue pour l'incrément non convergé.

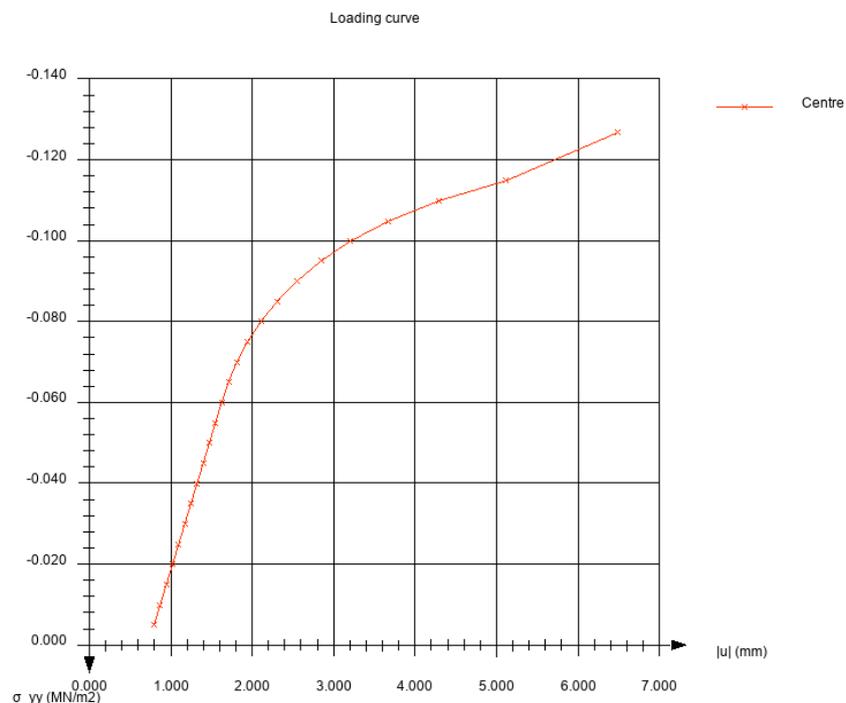


Figure 12: Courbe de chargement résultat du calcul en charge imposée



Utiliser l'outil  **Options du graphique** pour éditer le titre, les axes et la couleur des courbes.

On fait de même pour le calcul en déplacement imposé.

Les valeurs obtenues peuvent être exportées. Utiliser l'option «  **Export des données**. »

On les reporte sur un même graphe pour les comparer à la solution de référence. Cette comparaison est présentée dans la figure ci-dessous.

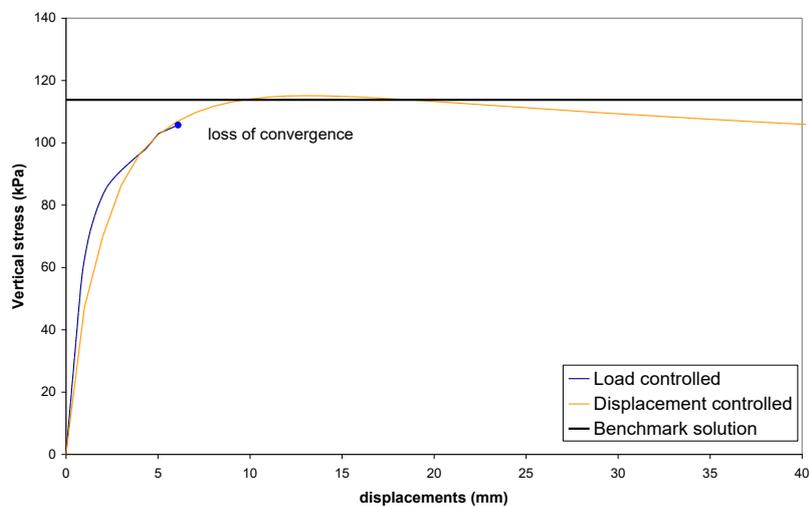


Figure 13: Courbes de chargement au centre de la semelle



Edited by :



8 quai Bir Hakeim

F-94410 SAINT-MAURICE

Tél. : +33 1 49 76 12 59

[cesar-lcpc@itech-soft.com](mailto:cesar-lcpc@itech-soft.com)

[www.cesar-lcpc.com](http://www.cesar-lcpc.com)

© itech - 2025