



Tutoriel 2.05

Capacité portante d'une fondation superficielle

© itech - 2020

| Ref: CESAR-TUT(2g-05)-v2021.0.1-FR

1. APERÇU

Le poids maximum que peut supporter une fondation superficielle, encore appelé capacité portante est une fonction de la cohésion, de l'angle de frottement, de la largeur B et de la forme de la fondation. Dans ce tutoriel, la fondation est une semelle circulaire rigide (diamètre $B=1\text{m}$), posée sur un sol homogène non drainé, modélisé en utilisant le critère de Tresca (cohésion non drainée C_u).

Le logiciel CESAR 2D est utilisé pour la conception des fondation superficielles. A l'aide de la méthode des éléments finis, nous déterminerons l'équilibre limite du système.

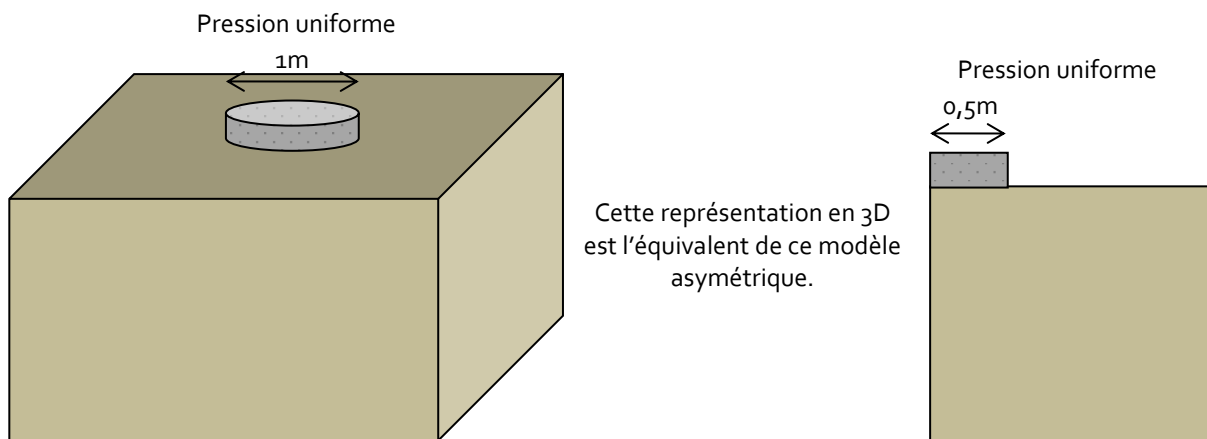
1.1. Objectifs du tutoriel

- 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
- Savoir utiliser les outils de post traitement

1.2. Spécifications du problème

Hypothèses générales

- Analyse statique,
- Comportement non linéaire du sol,
- Problème asymétrique, c-à-d seule une section de la fondation est modélisée et analysée





Propriétés des matériaux

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

	γ_h (kN/m^3)	E_u (MPa)	ν	C_u (kPa)	ϕ_u (°)	K_o
Poids du sol	20	50	0.45	20	0	0.5

2. GÉOMÉTRIE ET MAILLAGE

2.1. General settings

1. Démarrez CESAR 2D.
2. Définissez les unités  (**Unités**), situé en haut à gauche :
Dans la fenêtre, sélectionnez l'option **Général/Longueur** et choisissez **m** comme unité dans le déroulé de la deuxième colonne du cadre à gauche.
Sélectionnez, l'option **Mécanique/Force** et choisissez **kN** comme unité.
Sélectionnez, l'option **Mécanique/Déplacement** et choisissez **mm** comme unité.
Cliquez ensuite sur **Valider**.
3. Dans l'onglet  **Plan de travail**, définissez 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. Cliquez sur  . La fenêtre de dialogue **Points** apparait.
2. Entrez les coordonnées '**0, 0**', pour X et Y, et cliquez sur **Appliquer**.
3. Cochez la case "Points liés" pour générer automatiquement un segment entre deux points.
4. Entrez les coordonnées '**0.5, 0**', et appuyez sur **Appliquer**. Le Segment A est alors créé.
5. Entrez les coordonnées '**6, 0**', et appuyez sur **Appliquer**. Le Segment B est alors créé.
6. Entrez les coordonnées '**6, -10**', et appuyez sur **Appliquer**. Le Segment C est alors créé.
7. Entrez les coordonnées '**0, -10**', et appuyez sur **Appliquer**. Le Segment D est alors créé.
8. Entrez les coordonnées '**0, 0**', et appuyez sur **Appliquer**. Le Segment E est alors créé.



D'autres méthodes peuvent être utilisées :






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

2.3. Maillage 2D

Densité du maillage



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

1. Allez dans l'onglet MAILLAGE sur la barre de projet pour commencer à définir les intervalles le long des lignes.
2. Sélectionnez le bord A. Cliquez sur  **Découpage par nombre** pour découper le segment en nombre d'intervalle fixe. Entrez **5** pour le nombre d'intervalles. Cliquez sur **Appliquer**.
3. Cliquez sur  **Découpage variable** pour découper le segment en longueur variable. Cochez **Premier intervalle** et **dernier intervalle** pour définir la méthode. Entrez **0.1 m** comme **Premier intervalle** et **1 m** comme **dernier intervalle**. Cliquez sur le bord du segment B.
4. Sélectionnez le bord du segment C. Cliquez sur  **découpage par distance** pour découper le segment en longueur d'intervalle fixe. Entrez la longueur **1 m** dans le cadrant. Cliquez sur **Appliquer**.
5. Sélectionnez le bord du segment D. Cliquez sur  pour fixer une longueur pour les intervalles du segment. Entrez la longueur **1 m** dans le cadrant **Découpage par distance**. Cliquez sur Appliquer.
6. Cliquez sur  pour découper le segment en longueur variable. Cochez **Premier intervalle** et **dernier intervalle** pour définir la méthode dans le cadrant **Découpage variable**. Entrez la longueur **0.1 m** comme **Premier intervalle** et **1 m** comme **dernier intervalle**. Cliquez sur le bord du segment E. Cliquez sur **Appliquer**.




La position du clic indique où commence l'intervalle initial.



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

Maillage :

1. Cliquez sur l'onglet **maillage régions surfaciques** .
Choisissez **Quadrangulaire** comme type d'interpolation.
Choisissez **Triangle** pour la forme d'élément.
2. Cliquez 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. Vous pouvez ajuster cela dans les **Préférences>Paramètres du programme** : interpolation linéaire = interpolation épaisse et cubique=dense.

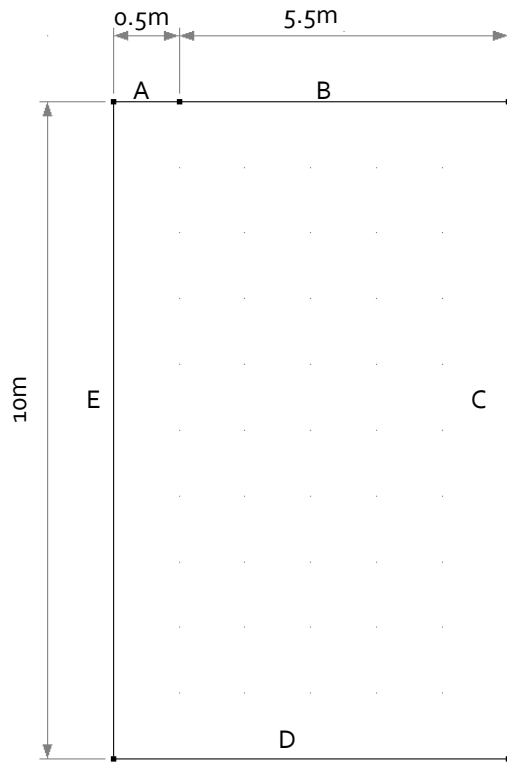


Figure 1: Géométrie

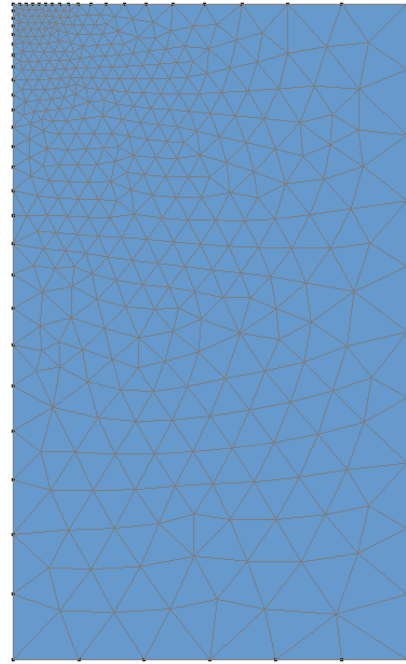


Figure 2: Exemple d'une maille

3. ANALYSE DE LA PRESSION LIMITE

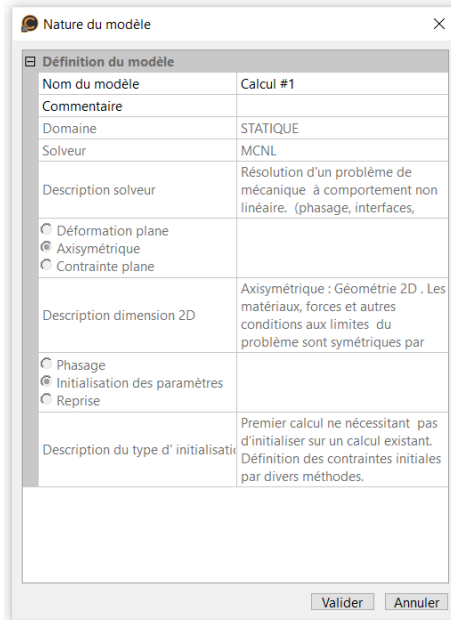
3.1. Paramètre du modèle

Définition du modèle :

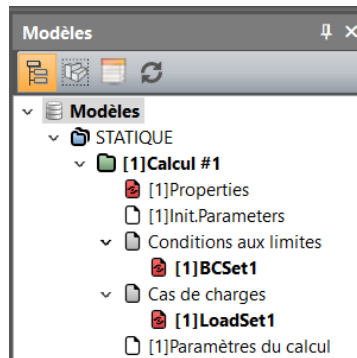
1. Dans le cadre à droite de l'espace de travail, la fenêtre présente l'arborescence des domaines physiques à analyser.
2. Faites un clic droit, sur STATIQUE. Cliquez sur **Ajouter un modèle**. Une nouvelle fenêtre de définition du modèle apparaît sur l'espace de travail.
3. Entrez *Calcul #1* comme "Nom du modèle".
4. Sélectionnez **MCNL** comme "Solveur".
5. Cochez **Axisymétrique** comme modèle de configuration, ainsi que la case **Initialisation des paramètres**.
6. Cliquez 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.

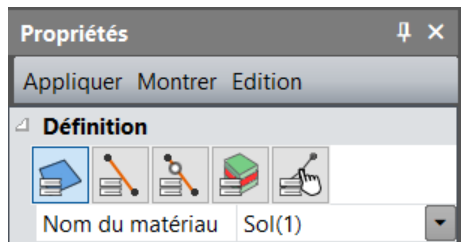
1. Cliquez sur  **Propriétés des blocs en 2D.**
2. Nommez chaque propriété choisie : (Exemple "Sol").
3. Dans les paramètres d'élasticité, choisissez "Elasticité linéaire isotrope" et définissez ρ , E and ν .
4. Dans les paramètres de plasticité, choisissez "Mohr-Coulomb sans écrouissage" et définissez c , φ and ψ .
5. Cliquez sur **Valider** and **Fermer**.

	ρ (kg/m ³)	E (MN/m ²)	ν	C_u (MN/m ²)	φ (°)	ψ (°)
Masse du sol	2000	50	0.45	0.02	0	0

Assignment des données :


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

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



Champ de contrainte initiale :

Le champ de contrainte initiale est considéré comme un champ de contrainte géostatique existant ; la contrainte verticale est liée à la contrainte horizontale par la valeur du coefficient K_0 .

1. Allez à l'onglet **INITIALISATION DES PARAMETRES.**
2. Sélectionnez l'icône  **Contraintes Géostatiques.**
3. Cliquez sur **Insérer** pour définir une nouvelle couche.
4. Entrez les valeurs suivantes :

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

5. **Validez.**

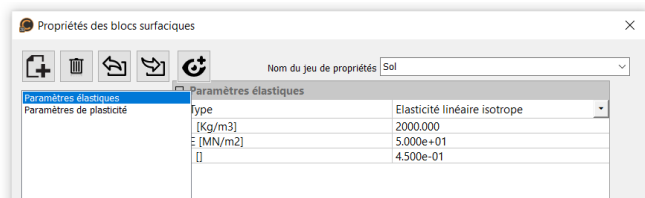


Figure 3: Fenêtre pour assignation des propriétés

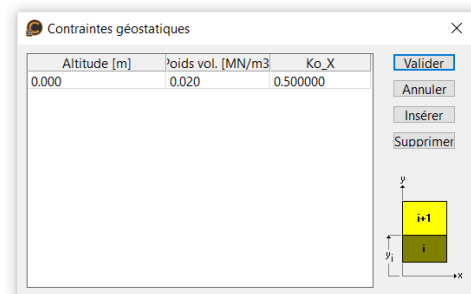



Figure 4: Fenêtre des données des contraintes géostatiques.

Conditions limites :

1. Allez à l'onglet **CONDITIONS LIMITES.**
2. Activez l'icône  **Blocage latéral et inférieur** pour définir les supports inférieurs et latéraux.
3. Cliquez 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. Faites un clic droit sur **Conditions limites**, dans l'arborescence, pour en générer d'autres.

Chargement :

1. Allez dans l'onglet **CHARGEMENT**.
2. Activez l'icône  **Pression répartie**.
 - Cochez la case "Pression uniforme".
 - Entrer la valeur 0.120 MN/m.
3. Sélectionnez le segment A.
4. Cliquer sur **Appliquer**.

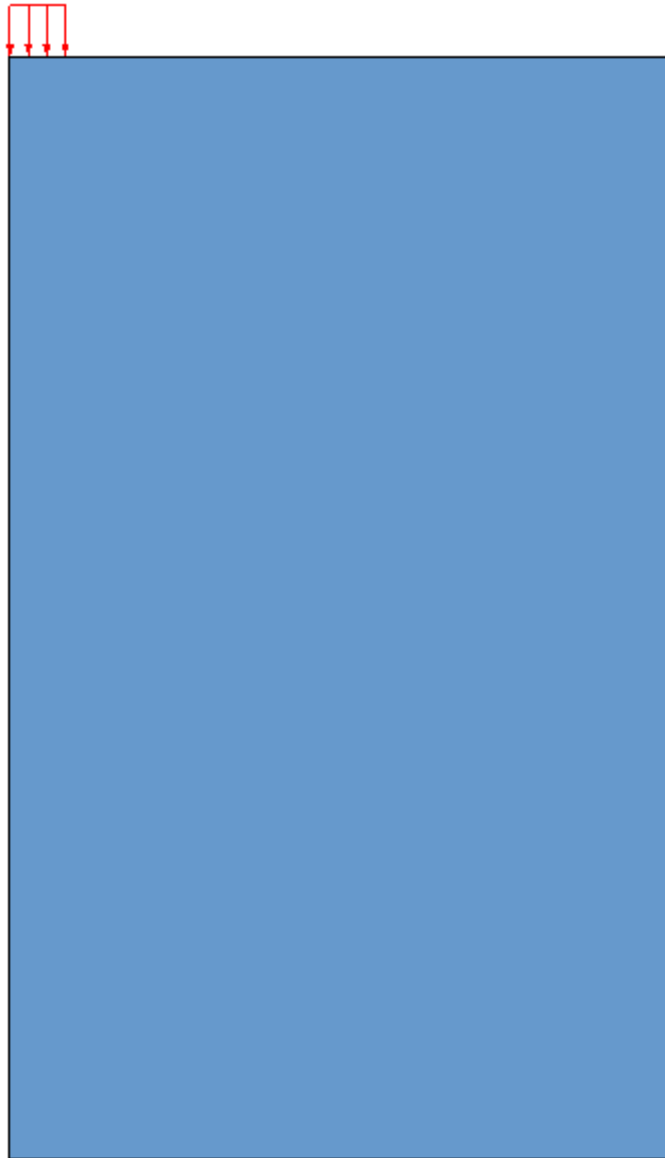
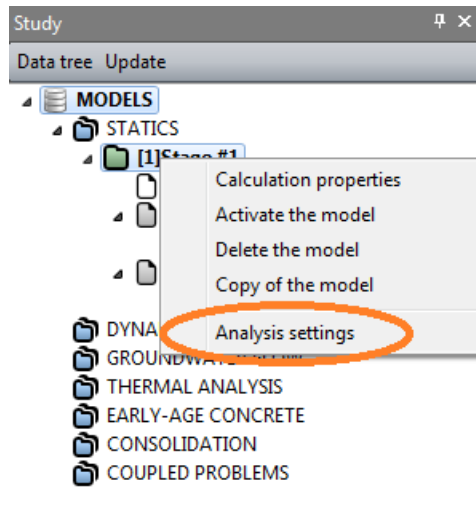


Figure 5: Diagramme de distribution de la pression uniforme

Paramètres des calculs :



1. Dans l'arborescence, faites un clic droit sur le titre calcul. Dans la fenêtre qui apparaît, sélectionnez **Paramètres du calcul**.
2. Dans la section des **Paramètres généraux**, entrer les valeurs suivantes :

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 : Multifrontal

Type de calcul : Facteur de sécurité

Cochez "Détection de la non convergence"

Définissez la "Valeur minimum" à 0.1

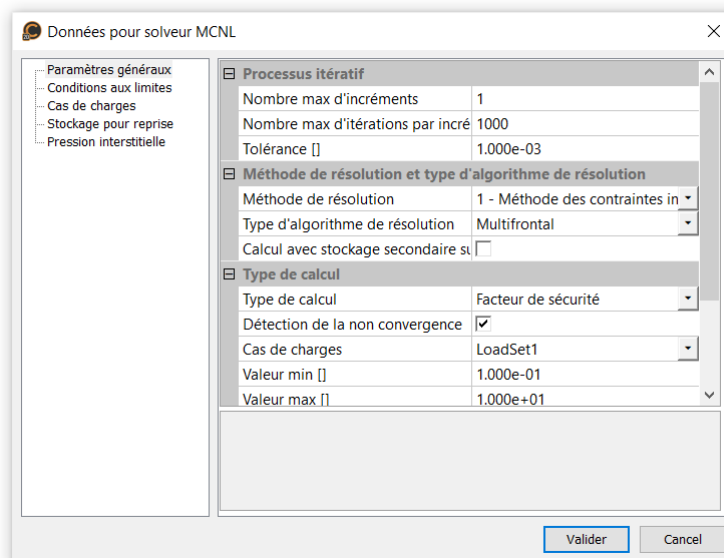
Définissez la "Valeur maximum" à 10

Définissez la précision à 0.1


Cochez "Stockage des déformations totales".


Cochez "Stockage des déformations plastiques".


3. Cliquez sur **Valider**

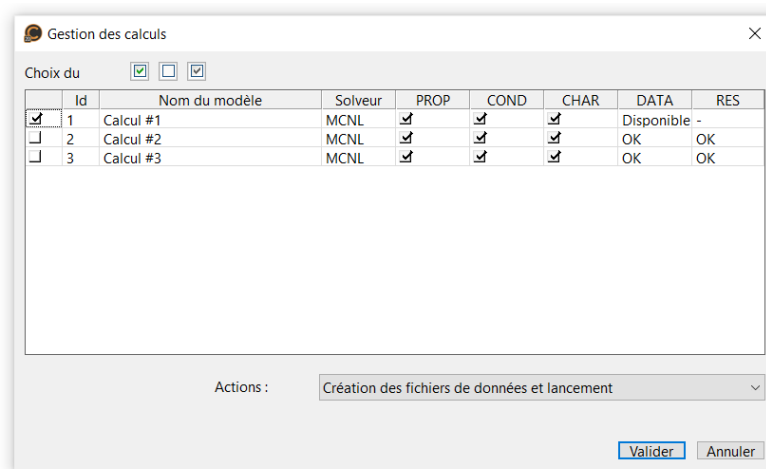



3.2. Résoudre

1. Allez dans l'onglet **GESTION DES CALCULS**.
2. Cliquez sur l'icône  **Gestion des calculs**.
3. Sélectionnez le modèle
4. Sélectionnez **Création des fichiers de données et lancement**. Cliquez 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 d'itération.

 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.



 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).

3.3. Résultats

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




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

Selon les "Facteurs de capacité portante non drainé des semelles coniques pour des sols argileux", G. T. Houlsby and C. M. Martin, Géotechnique 53, No. 5, 513–520, 2003; la capacité portante ultime obtenue pour la semelle considérée dans ce problème est :

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

Le facteur de sécurité calculé est 0.99. Ainsi, la pression limite obtenue est de 118.8 kPa, ce qui est très proche de la valeur théorique qui est de 113.8 kPa.

Affichage du tracé scalaire des déformations plastiques

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

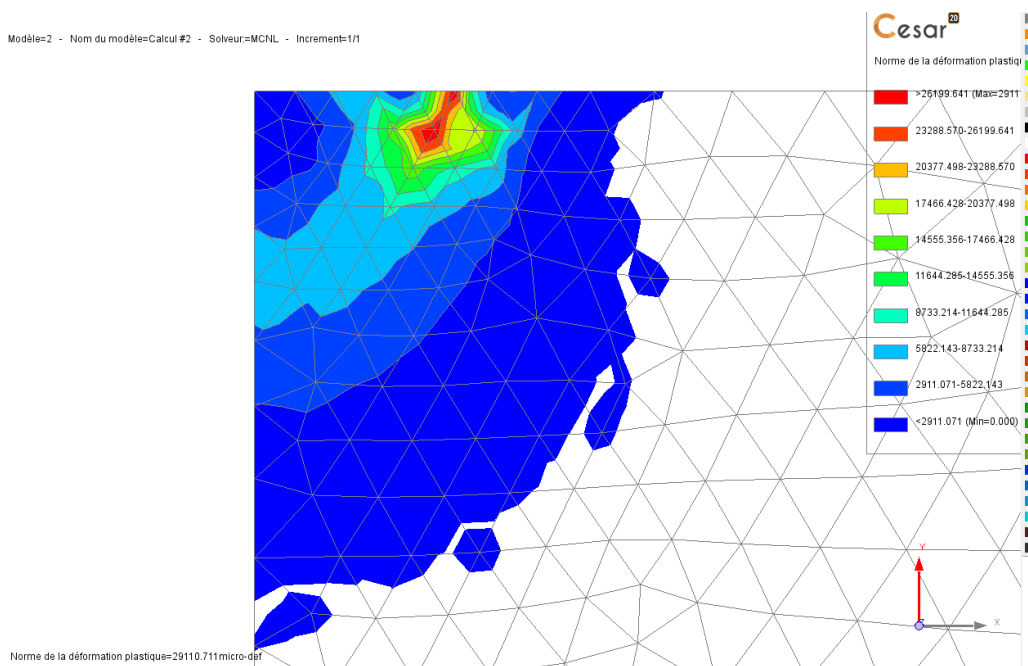


Figure 6: Vue du champ de déformation plastique

4. AUTRES TYPES DE CALCUL POUR DÉTERMINER LA PRESSION LIMITE

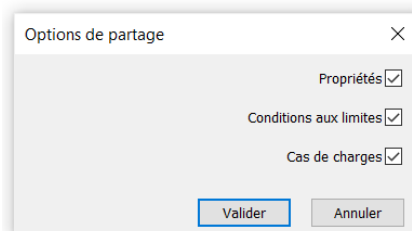
4.1. Analyse de charge contrôlée

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

Définition du modèle :

1. Dans **L'ARBORESCENCE**, faites un clic droit sur **Calcul #1** puis cliquez sur **Copie du modèle**.
2. Définissez le type de modèle :
Entrez Calcul #2.
Sélectionnez **Initialisation des paramètres** comme type de calcul.
Valider.
3. Partagez 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. Faites un clic droit, sur **Calcul #2** dans **L'ARBORESCENCE**, et activez and **Paramètres du calcul**.
2. Dans les **Paramètres généraux** :
Processus itératif :
Nombre max d'incréments : 12
Nombre max d'itérations par incrément :1000
Tolérance : 0,001
Méthode de résolution : 1- Méthodes des contraintes initiales
Type d'algorithme : Pardiso

Type de calcul : Standard

3. Validez 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.

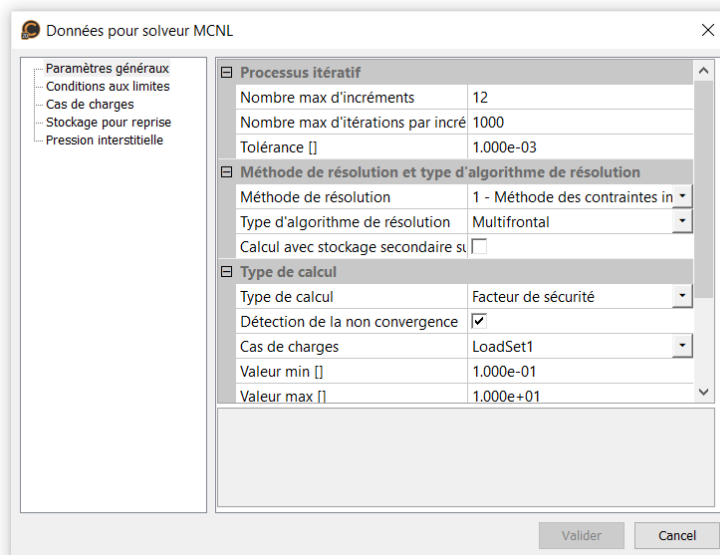



Figure 7: Fenêtre des paramètres du calcul

Résoudre :

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

1. Cliquez sur  **Gestions des calculs**.
2. Sélectionnez le modèle **Calcul #2**.
3. Sélectionnez **Création des fichiers de données et lancement**.
4. **Validez**.



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.

Nous voyons que le calcul s'est arrêté à l'incrément #12, car les critères de convergence n'ont pas été vérifiés jusqu'au nombre maximal d'itération (1000). Cela signifie que l'équilibre du sol n'est pas atteint au 12ème incrément charge.

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 entre 110 kPa and 120 kPa.

```
-----
Iteration number 992 Convergence index (residual) = 0.11032E+00
Iteration number 993 Convergence index (residual) = 0.11029E+00
Iteration number 994 Convergence index (residual) = 0.11027E+00
Iteration number 995 Convergence index (residual) = 0.11025E+00
Iteration number 996 Convergence index (residual) = 0.11023E+00
Iteration number 997 Convergence index (residual) = 0.11021E+00
Iteration number 998 Convergence index (residual) = 0.11019E+00
Iteration number 999 Convergence index (residual) = 0.11017E+00
Iteration number 1000 Convergence index (residual) = 0.11015E+00

CPU time for iteration 12 ( 1001 iter.)      :    10.68 seconds
CPU time for output processing              :     0.02 seconds
```

**** STOP because of NO CONVERGENCE ****

STOP in EXMCNL, IERRCS = 200

```
-----
END of analysis in EXEC mode
-----
```

Figure 8: Extrait de la liste de l'analyse à la fin du calcul

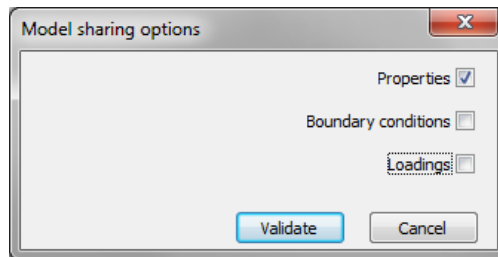
4.2. Analyse en déplacements imposés



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

Définition du modèle :

1. Dans **L'ARBORESCENCE**, faites un clic droit sur **Calcul #2** puis cliquez sur **Copie du modèle**.
2. Définissez le type de modèle :
Entrez Calcul #3.
Sélectionnez **Initialisation des paramètres** comme type de calcul.
Validez.
3. Partagez les **Propriétés**. Ne pas partager les **Conditions aux limites** et les **Cas de charges**.
Ensuite, **Validez**.



Propriétés des matériaux :


Aucun changement.

Champ de contrainte initial :

Aucun changement.

Conditions aux limites :

Les déplacements forcés sont considérés comme de nouveaux cas de conditions aux limites. Il n'y a pas de changement de support standard aux limites.

1. Dans **L'ARBORESCENCE**, faites un clic droit sur **Condition aux limites** et cliquez sur **Ajouter un cas de conditions aux limites**.
Nommez le "déformation imposée"
Validez.
2. Allez dans l'onglet **CONDITIONS LIMITES**. Sélectionnez "déformation imposée" dans le cadre des cas de conditions aux limites.
3. Cliquez sur  **Définition générale**.
Cochez la case **V imposé**.
Entrez la valeur **-40 mm**.
Sélectionnez le segment A.
Appliquez.

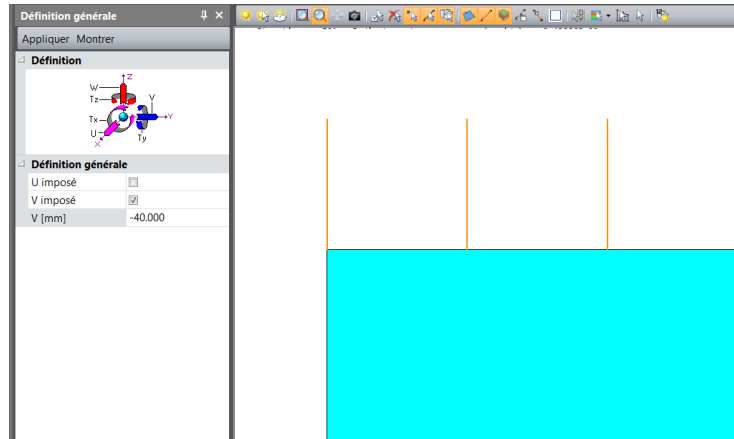


Figure 9: Vue de l'interface du logiciel après application de la déformation imposée

Cas de charges :

Après avoir imposé une déformation, la pression uniforme devient inutile. On peut donc la supprimer.

1. Allez dans l'onglet **CHARGEMENT**.
2. Sélectionnez le segment A.
3. Cliquez sur **Supprimer** puis **Appliquer**



Le cas de charge active (Loadset1) ne peut être supprimé. Le logiciel nécessite qu'il y ait au moins un cas de charge actif.

Paramètres du calcul :

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

Processus itératif :	
Nombre max d'incréments :	20
Nombre max d'itérations par incrément :	500
Tolérance :	0,001
Méthode de résolution :	1- Méthodes des contraintes initiales
Type d'algorithme :	Multifrontal
Type de calcul :	Standard
3. Validez 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, allez dans l'onglet **GESTIONS DES CALCULS**.

1. Cliquez sur **Gestion des calculs**.
2. Sélectionnez le modèle **Calcul #3**.
3. Sélectionnez **Création des fichiers de données et lancement**. Cliquez sur Valider.

4.3. Analyses alternatives

4.3.1 Analyse élastique linéaire en condition drainée avec variation du module de Young

Une analyse élastique linéaire peut être réalisée pour évaluer le tassement sous la semelle en condition drainée. L'augmentation du module de Young avec la profondeur est un facteur important à prendre en considération. Diviser le modèle en plusieurs couches (2m, 3m et 5m) par exemple) et évaluer le module en condition drainée au centre de chaque couche en utilisant l'équation empirique ' Ohde-Janbu :

$$E = E^{ref} \left(\frac{\sigma_v}{\sigma^{ref}} \right)^N$$

Avec les propriétés suivantes :

	γ_h (kN/m ³)	E (MPa)	N	v
Mass du sol	20	10 at $\sigma^{ref} = 100$ kPa	0.7	0.33

4.3.2 Analyse élastoplastique non linéaire avec variation de la cohésion en condition non drainée

L'augmentation de la cohésion en condition non drainée avec la profondeur est un facteur important à prendre en considération. Divisez la zone supérieure du modèle en plusieurs couches fines et évaluez la cohésion en condition non drainée au centre de chaque couche en utilisant la relation suivante :

$$\varphi_u \approx 0$$

$$c_u = \frac{1}{2} (\sigma_v^{ini} + \sigma_h^{ini}) \sin \varphi + c \cos \varphi$$

Avec les propriétés suivantes :

γ_h (kN/m ³)	E_u (MPa)	N	v	c_u (kPa)	φ_u (°)	K_o
20	50 at $\sigma^{ref} = 100$ kPa	0.7	0.45	22	35	0.5

Note 1 : La plasticité concentrée dans les premiers mètres du sol, les couches avec une cohésion variable, doivent être assez fines afin d'obtenir l'effet attendu sur le résultat.

Note 2 : Utilisez la formule d'Ohde-Janbu pour évaluer la rigidité en condition non drainée de chaque couche du modèle.

4.4. Résultats

Analyse en chargement contrôlé

La convergence n'a pas été obtenue à la 12^{ème} étape d'incrément. Cela montre que le sol est en rupture. La valeur de la pression limite se trouve entre 110 kPa et 120 kPa.

Déplacement contrôlé avec analyse élastique linéaire et variation du module de Young

La courbe contrainte-déformation obtenue par l'analyse des éléments finis est comparée à la solution de référence. Les résultats des différentes hypothèses d'applications de charges au centre de la semelle est présenté dans la figure ci-dessous.

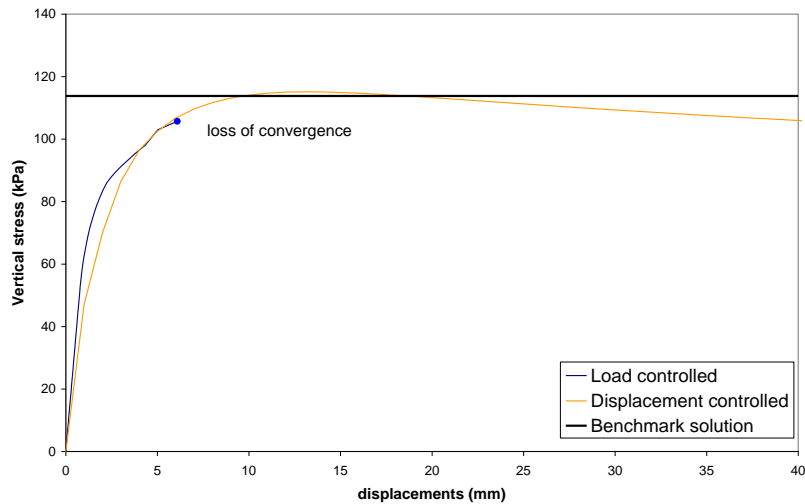


Figure 10: La courbe contrainte-déformation au centre de la semelle

Déplacement imposé avec analyse élastique non linéaire et variation de la cohésion en condition non drainée :

Les résultats sont présentés ci-dessous pour un modèle où, les 2 premiers mètres du sol sont divisés en 3 sous couches égales (avec chacune 667mm d'épaisseur). La figure 11 montre les résultats des contraintes et déformations obtenues. Notez qu'une discontinuité de la courbe est visible à l'intersection avec la capacité portante calculée, ce qui correspond aussi à la cohésion de la première sous couche.

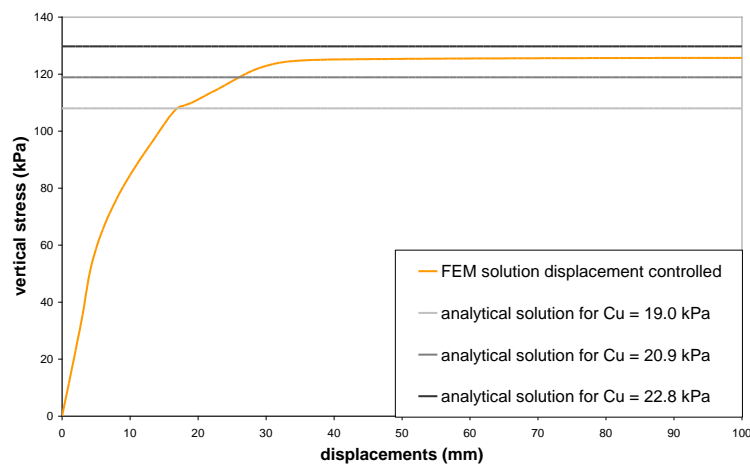


Figure 11: La courbe contrainte-déformation au centre de la semelle

Edited by :



8 quai Bir Hakeim

F-94410 SAINT-MAURICE

Tél. : +33 1 49 76 12 59

cesar-lcpc@itech-soft.com

www.cesar-lcpc.com

© itech - 2020