



UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



Faculté Des Sciences Appliquées  
Département De Génie Civil

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention  
du :

**Diplôme de Mastre 2**  
Spécialité : Génie Civil  
Option: génie de construction

**Analyse numérique par la méthode des éléments finis d'une  
semelle filante avec la prise en compte de la dilatance des sols**

Présenté par :  
**Acid Djamila**

# PLAN DE TRAVAIL

## INTRODUCTION

### I- RAPPEL DES FONDATION SUPERFICIELLES

### II- ANALYSE NUMÉRIQUE D'UNE SEMELLE FILANTE

#### II.1-Présentation de l'outil de simulation numérique

**II-1- Sol purement frotton ( $\varphi \neq 0, \gamma \neq 0, C \approx 0$ )**

**II-1.2- Sol purement dilatant ( $\varphi = \psi$ )**

**II-1.3- Sol moyennement dilatant ( $\psi \leq \varphi$ ).**

***Conclusion***

## INTRODUCTION

Les méthodes de calcul de la capacité portante des fondations, utilisées à l'état actuel, considèrent que le comportement plastique des sols est purement dilatant, (où la valeur de l'angle de frottement interne  $\phi$  et l'angle de dilatance  $\psi$  du sol sont égaux).

Par contre, les expériences réalisées sur les sols frottants (sableux) à l'aide des essais triaxiaux ont démontrés que l'angle de dilatance est est différentes de l'angle de frottement interne ( $\psi < \phi$  ). Donc le comportement réel des sols est peu dilatant.

C'est dans ce contexte globale, que s'insert notre étude numérique et qui consiste à étudier numériquement l'effet de la dilatance sur les fondations superficielles, en utilisant le le code de simulation en éléments finis, Plaxis V.8.2.

# OBJECTIF

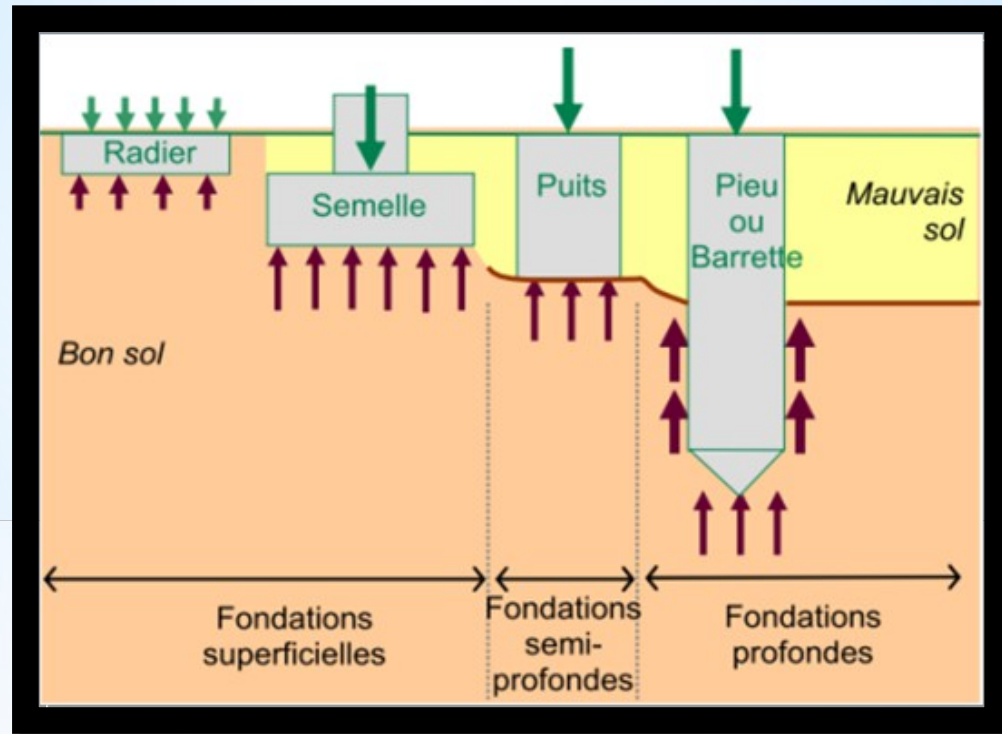
L'objectif de notre travail est de montrer numériquement l'influence du phénomène de la dilatance des sols sur

- ❑ La valeur de la capacité portante d'une fondation superficielle
- ❑ L'évolution des mécanismes de ruptures engendrés dans le sol de fondation.

# I-Rappel des types des fondations

On peut distinguer 3 types de fondation en fonction du rapport (H/B :

- Si  $H/B < 2$ , on est dans le cas d'une fondation superficielle ;
- Si  $2 < H/B < 6$  Fondation semi-profonde ;
- Si  $H/B > 6$  et  $D > 3m$  : Fondation profond).



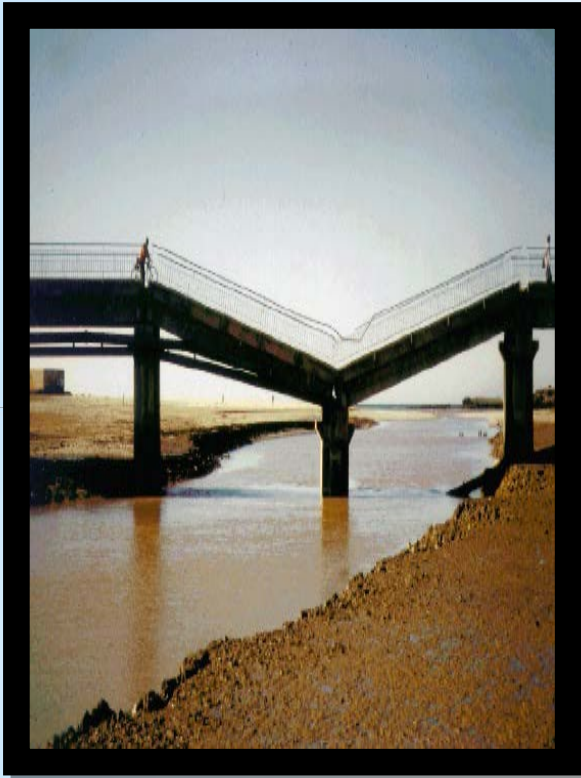
Les types de fondations superficielles



# I.1-Exemples de rupture des fondation

Le dimensionnement des fondations consiste a calculer :

- La capacité portante du sol de fondation (pas de rupture du sol)
- Estimer le tassement du sol de fondation (Acceptables)



Rupture d'une pile de pont  
(poinçonnement)

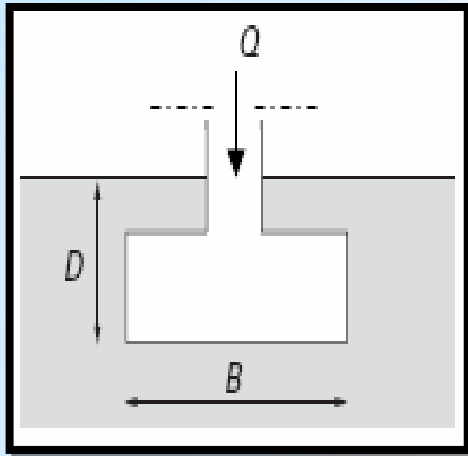


Inclinaison de la tour de Pize  
( tassement différentiel)

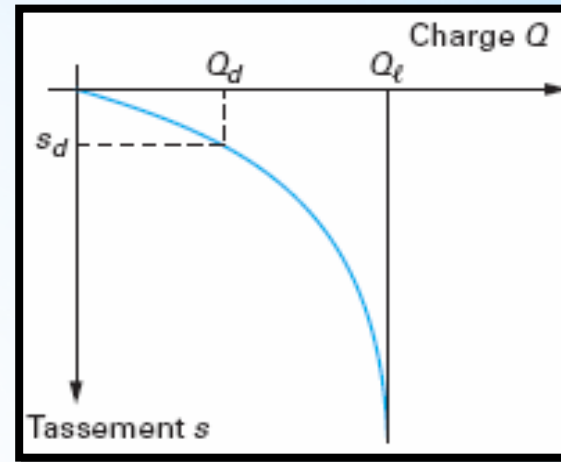
## I.2-Cas d'une Fondation Superficielle

### ➤ Notion de la Capacité portante

Le cas d'une semelle filante chargée verticalement, sur un sol semi-infini et homogène.



Semelle filante sous chargement vertical



Courbe : Charge - Tassement

$$q_l = Q_L / A$$

Expression de la capacité portante Théorie (Terzaghi (1943))

$$q_l = C.N_c + q.N_q + \frac{1}{2}.\gamma.B.N_\gamma$$

Les valeurs des facteurs de portance sont exprimés par :

$$N_c = (N_q - 1) / \cot\varphi$$

$$N_q = \left[ \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) e^{\pi \tan \varphi} \right]$$

$$N_\gamma = \left[ \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) e^{\pi \tan \varphi} - 1 \right] \tan(1.4 \varphi)$$



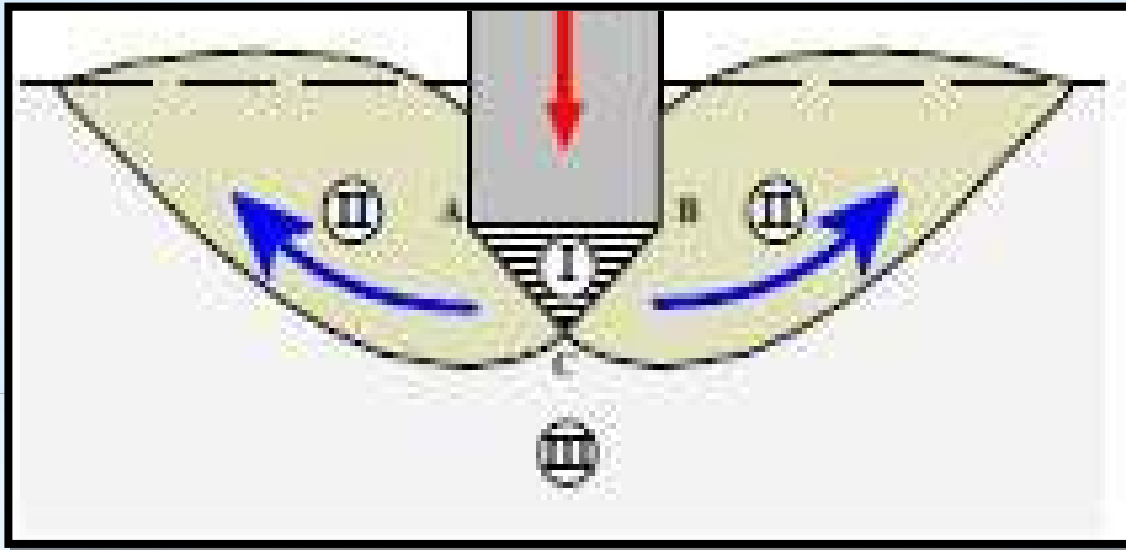
## ➤ Notion du mécanisme de rupture

Le mécanisme de rupture dans le sol de fondation est défini par 3 zones :

Zone I : située directement sous la semelle, fortement comprimée et se déplace avec la semelle.

Zone II : où le sol est refoulé vers la surface, Il y produit une rupture généralisée.

Zone III : le sol est peu ou pas perturbé par la rupture ( au repot)



**Mécanisme de rupture type**

## ***II- Analyse numérique d'une semelle filante***

## II.1-PRÉSENTATION DU LOGICIEL PLAXIS



Dans la pratique, l'analyse de projets géotechniques est possible grâce à nombreux codes d'éléments finis ; parmi ces codes on trouve le logiciel PLAXIS V8.2 qui est un programme d'éléments finis spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques.

## L'interface d'utilisation de Plaxis se propose de quatre sous-programmes :

Le programme d'entrée de données (Input)



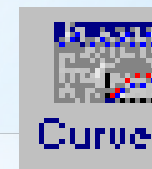
Le programme de calcul (Calculations)



Le programme de résultats (Output)

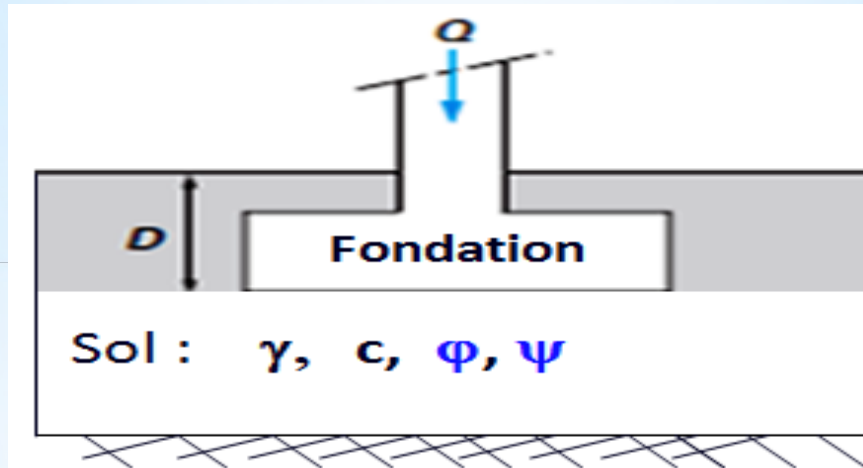


Le programme courbes (Curves)



## II.2- Étude paramétri que d'un sol frottant ( $\phi \neq 0, \psi = 0, c \approx 0$ )

C'est le cas fréquent des sols frottant (sableux), où le sol de fondation est caractérisé par un angle de frottement interne ( $\phi$ ) très élevé, un angle de dilatance ( $\psi \neq 0$ ), une cohésion quasiment nulle ( $c=0$ ) et un poids volumique non nul  $\gamma \neq 0$



Fondation superficielle



# CA1:SOL PUREMENT DILATANT ( $\phi=\psi$ )

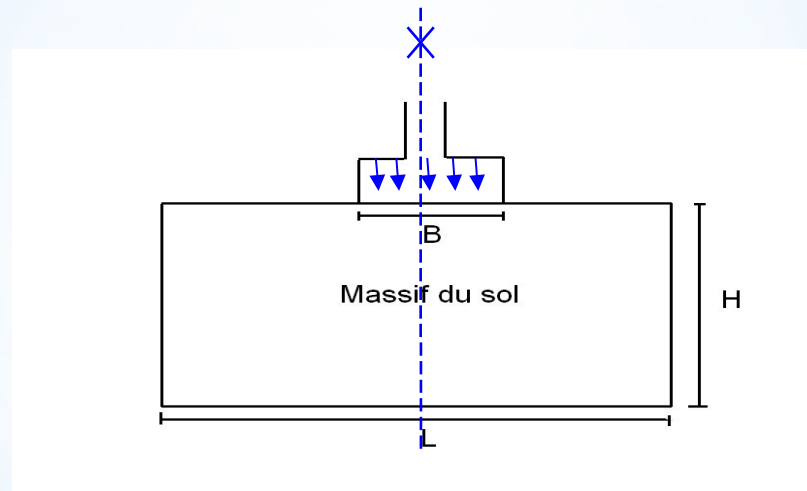
Deux exemples de références seront traités et dont on connaît les solutions théoriques (d'après Terzaghi). Il s'agit du cas où  $\phi=\psi=30^\circ$  et du cas  $\phi=\psi=0^\circ$

## Exemple1 : $\phi=\psi=0^\circ$ :

### □ Etape 1-Données générales

On considère une semelle filante rigide de largeur  $B=2$  m reposant à la surface d'un massif de sol homogène et semi-infini.

Vue les conditions de symétrie du domaine d'étude par rapport à l'axe passant par le centre de la semelle, le problème sera étudié uniquement en moitié ( $B/2=B'=1$ m,  $L=5$ m et  $H=4$ m)

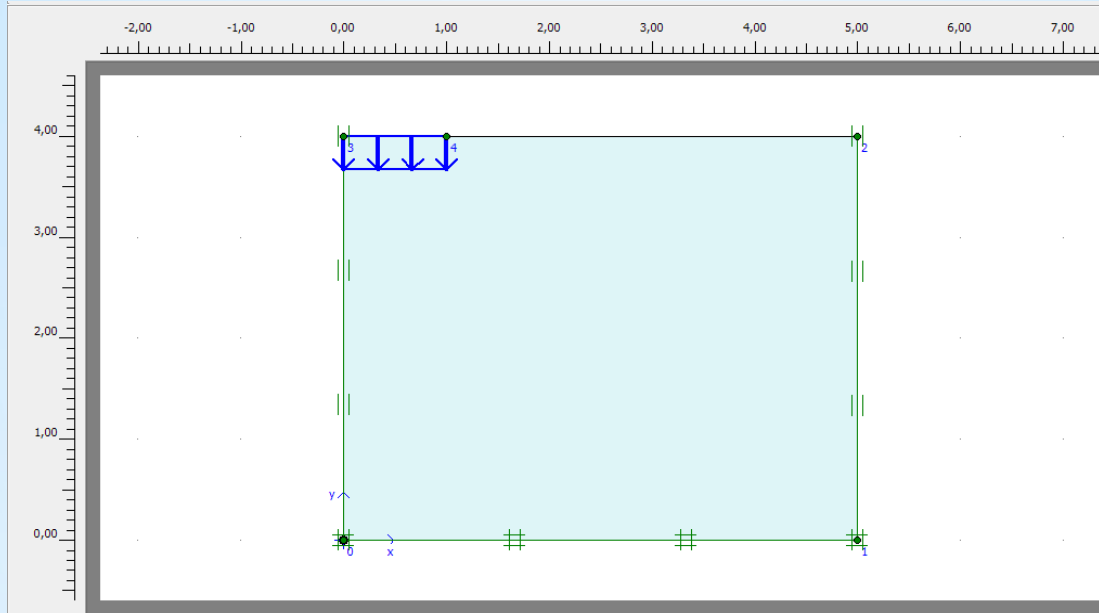


## ▪ Propriétés physiques et mécaniques du sol de fondation

Le sol de fondation est de nature sableuse, pulvérulent, présentant les caractéristiques suivantes :

Paramètre	Nom	Valeur	Unité
Modèle du matériau	Model	Mohr-	/
Type de comportement du matériau	Type	coulomb drainé	/
Poids volumique « non saturé »	$\gamma_{\text{unsat}}$	17	KN/m <sup>3</sup>
Poids volumique « saturé »	$\gamma_{\text{sat}}$	20	KN/m <sup>3</sup>
Perméabilité horizontale	$K_x$	1	m/day
Perméabilité verticale	$K_y$	1	m/day
Module d'Young (constant)	E	13000	KN/m <sup>2</sup>
Coefficient de poisson	$\nu$	0.3	/
Cohésion	$C_u$	1	KN/m <sup>2</sup>
Angle de frottement	$\varphi$	0	Degré
Angle de dilatance	$\psi$	0	Degré

## ▪ Entrée des caractéristiques générales



**Géométrie du problème**

## ▪ Caractéristiques du sol.

Dans Matériels set, choisir New : on a choisi le modèle de Mohr-Coulomb, qui le modèle le plus adapté au sol frottant :

Mohr-Coulomb - sol pesant et purement frottant

General | Parameters | Interfaces

Material Set

Identification: sol pesant et p/ frottant

Material model: Mohr-Coulomb

Material type: Drained

General properties

$\gamma_{\text{unsat}}$ : 17,000 kN/m<sup>3</sup>

$\gamma_{\text{sat}}$ : 20,000 kN/m<sup>3</sup>

Permeability

$k_x$ : 1,000 m/day

$k_y$ : 1,000 m/day

Comments

Advanced...

Next Ok Cancel Help

*Propriétés générales*

Mohr-Coulomb - sol pesant et p/ frottant

General | Parameters | Interfaces

Stiffness

$E_{\text{ref}}$ : 1,300E+04 kN/m<sup>2</sup>

$\nu$  (nu): 0,390

Strength

$c_{\text{ref}}$ : 1,000 kN/m<sup>2</sup>

$\phi$  (phi): 0,000 °

$\psi$  (psi): 0,000 °

Alternatives

$G_{\text{ref}}$ : 4676,259 kN/m<sup>2</sup>

$E_{\text{oed}}$ : 2,593E+04 kN/m<sup>2</sup>

Velocities

$V_s$ : 51,920 m/s

$V_p$ : 122,300 m/s

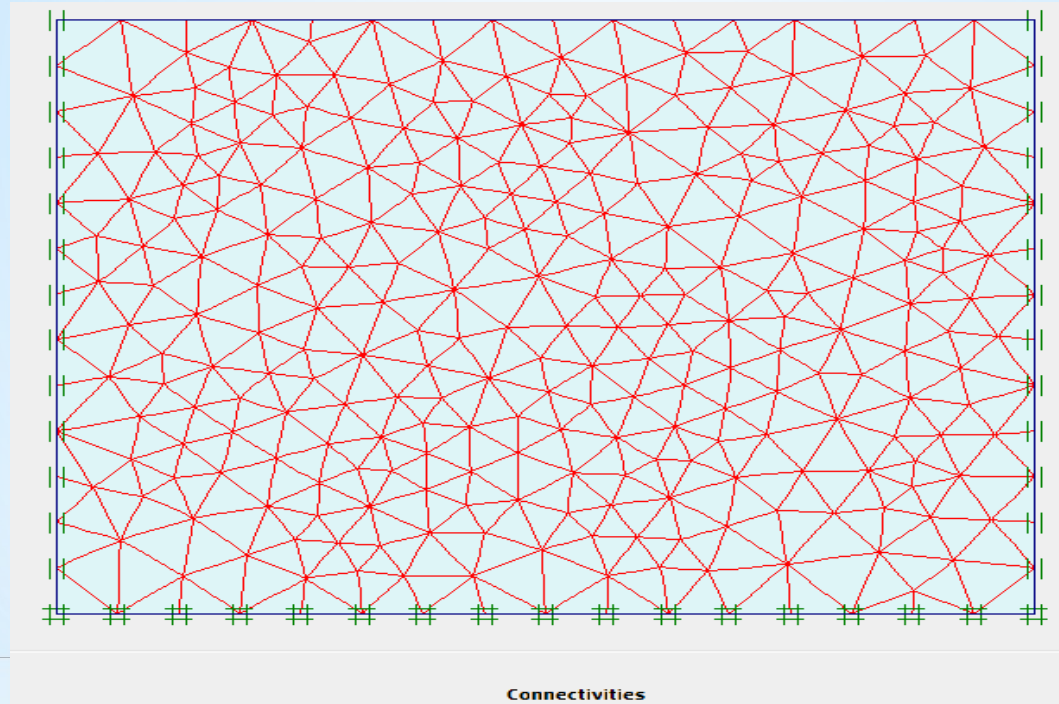
Advanced...

Next Ok Cancel Help

*Valeurs des paramètres*

## □ Maillage.

**Le modèle utilisé comporte des éléments triangulaires à 15 nœuds. En raffinant deux fois autour de l'interface on obtient le maillage suivant**

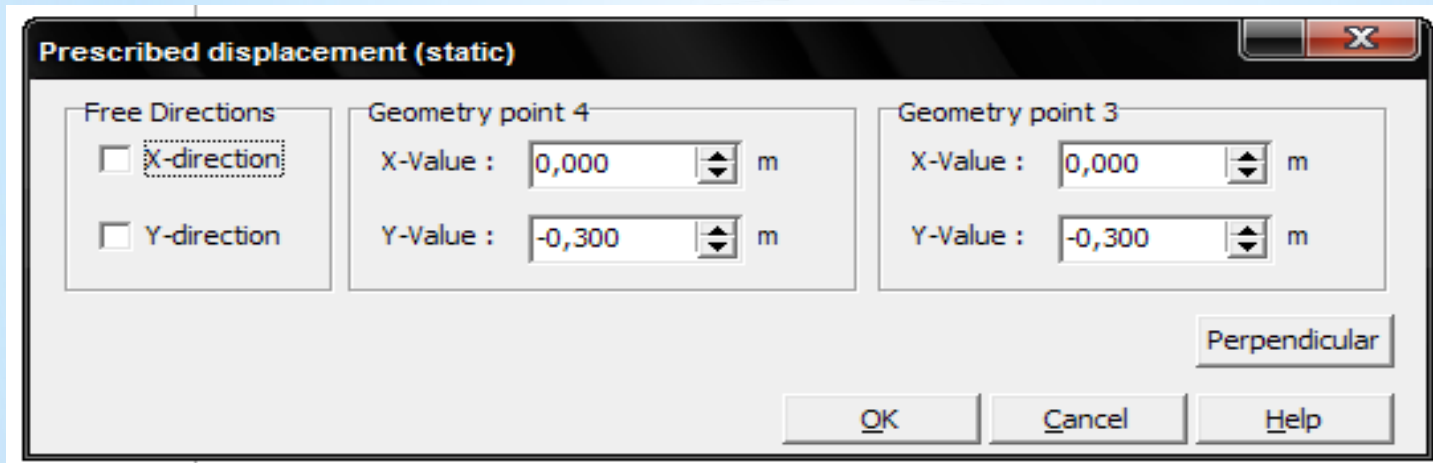


*Maillage du problème.*



## □ Choix de déplacement

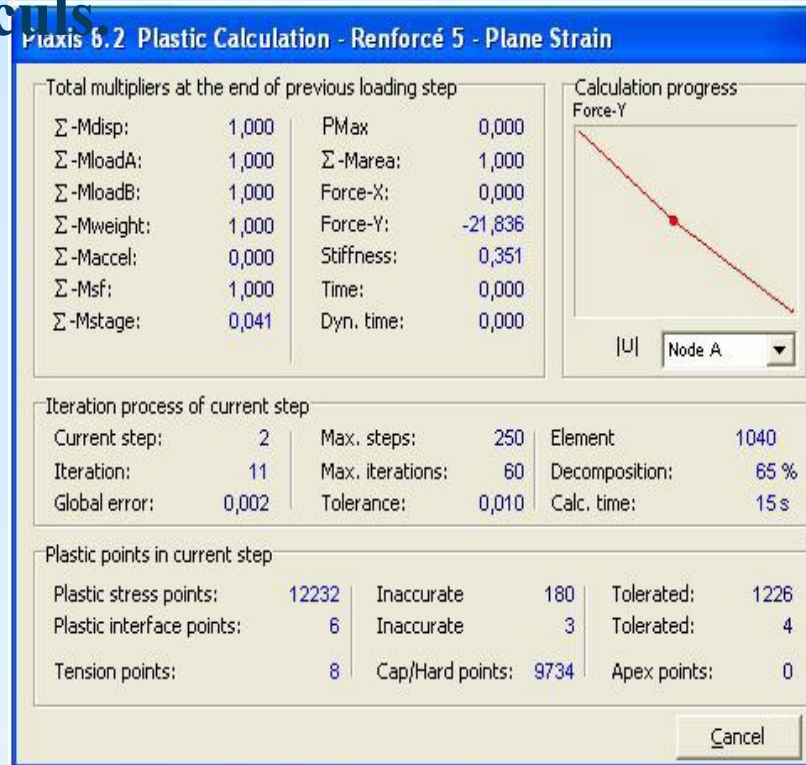
Le déplacement prescrit est de valeur de 0,3 m diriger vers le bas.



## □ Calculs.

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, On peut alors lancer le calcul. Pendant celui-ci, une fenêtre d'information apparaît donnant l'évolution du calcul.

## □ Etape 2 Calculs



Fenêtre d'évolution de calcul..

## □ Résultats

Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les déplacements et les Contraintes aux points choisis précédemment. En cliquant sur le bouton on obtient les résultats suivant :

➔ Output...

# A-capacité portante :

## ▪ Contact Lisse :

$$Ql = Fy = 5.276KN.$$

$$ql = Ql/(BXL) = Ql/1x1 = 5.27KN/m^2$$

La valeur théoriques est :  $ql=5.14KN/m^2$

l'erreur est de l'ordre de 2.5%

D'après la relation :

$$(q_{th}-q_{nu})/ q_{th} = (5.14-5.27/5.14=-2.5\%$$

Calculation information

Multipliers Additional Info Step Info

Step Info

Step	173 of 173	Extrapolation factor	0,758
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000

Staged construction

Active proportion total area	Marea :	0,000	ΣMarea :	1,000
Active proportion of stage	Mstage :	0,006	ΣMstage :	1,000

Forces

ForceX	0,000	kN/m
ForceY	-5,276	kN/m
ForceZ	N/A	kN/m

Consolidation

Realised Pmax :	0,000	kN/m <sup>2</sup>
-----------------	-------	-------------------

Tunnels

View the title bar of the individual beam forces plots for contraction of tunnels

OK Print Help

Contact Lisse

## Contact rugueux :

$$Ql = Fy = 5.36\text{KN}$$

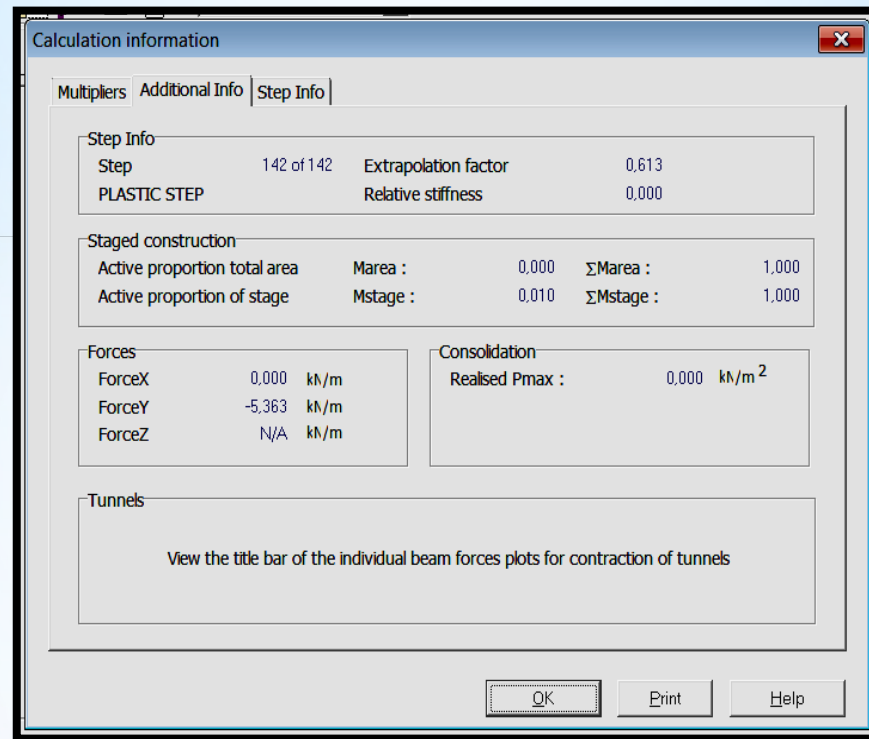
Ce qui donne une capacité portante par unité de surface :

$$q_l = Ql/(BXL) = Ql/1 \times 1 = 5.36\text{KN/m}^2$$

La valeur théorique est :  $q_l = 5.27\text{KN/m}^2$

Le pourcentage de l'erreur est exprimé par la relation est de 1%,

d'après la relation suivante :  $(q_{th} - q_{nu}) / q_{th} = (5.27 - 5.36) / 5.27 = -0.01 = 1\%$

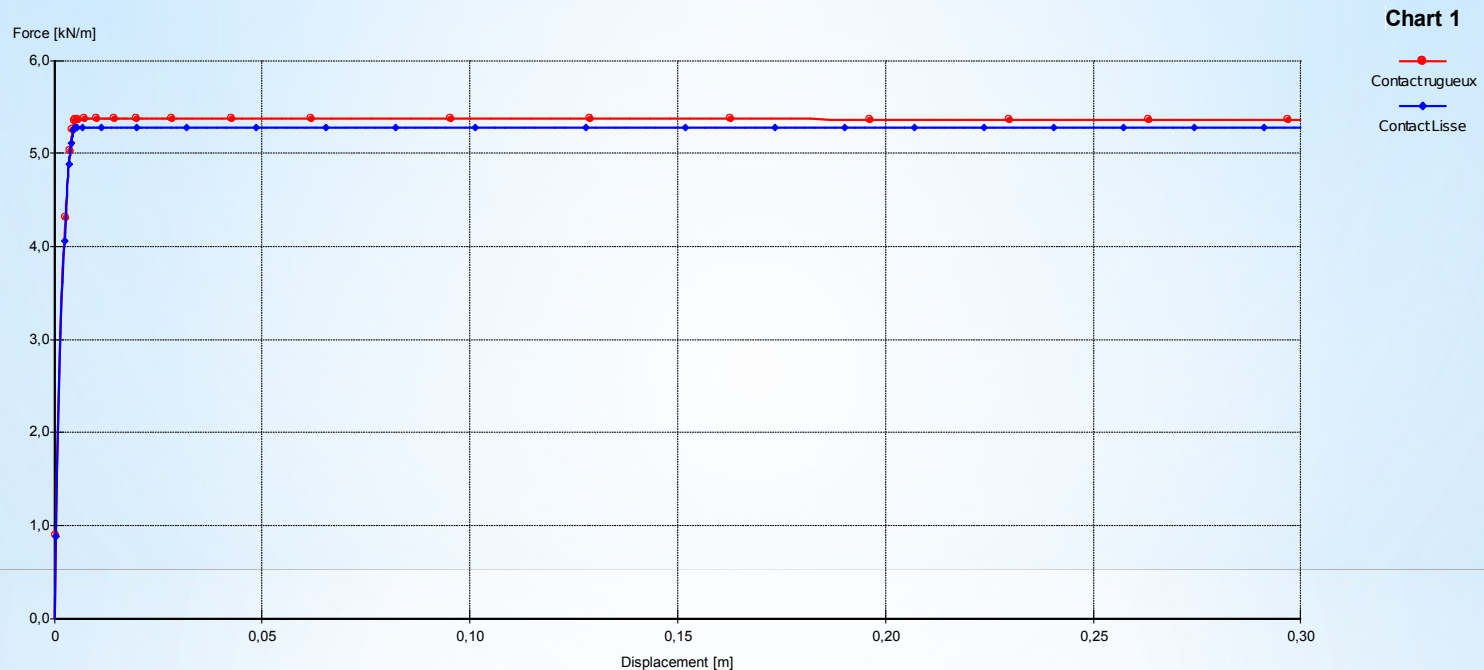


# Contact Rugueux

## B-Courbes : Capacité portante –Déplacements (Tassements)

Pour la courbe charge-déplacement nous nous permet de suivre l'évolution de la capacité portante (représentée par un point situé a l'extrémité de la semelle) en fonction des déplacements verticaux descendants (tassements).

On constate que la valeur de la capacité portante pour le cas lisse est toujours inférieure au cas du contact rugueux.

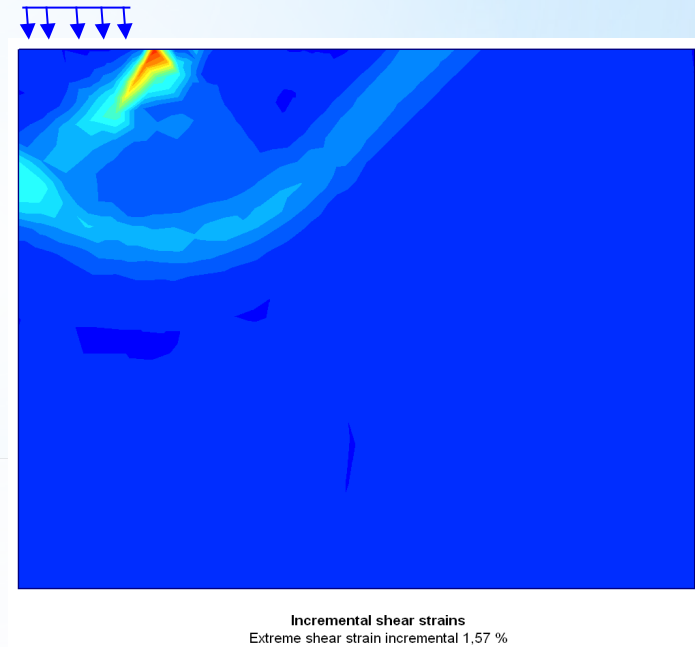
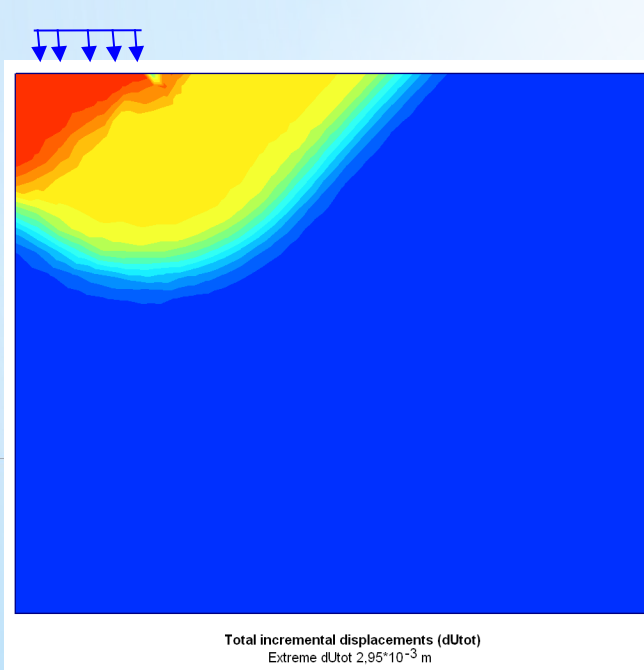


Courbe charge – déplacement.

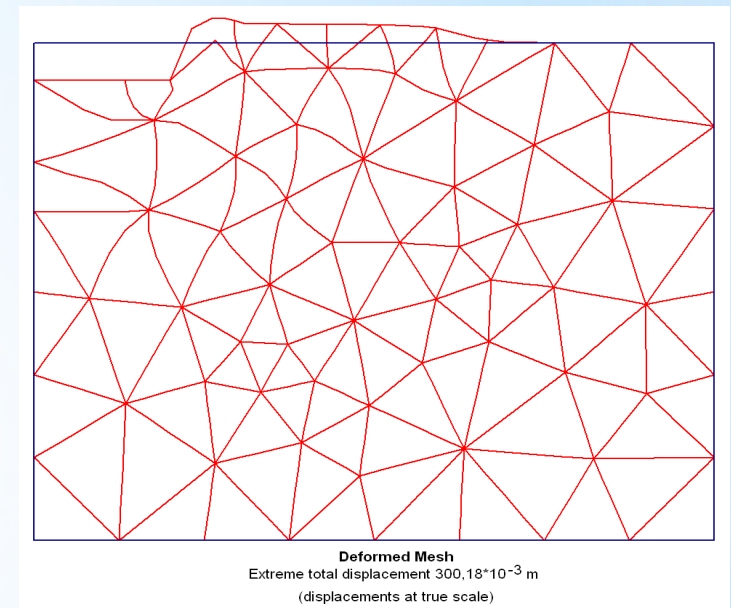
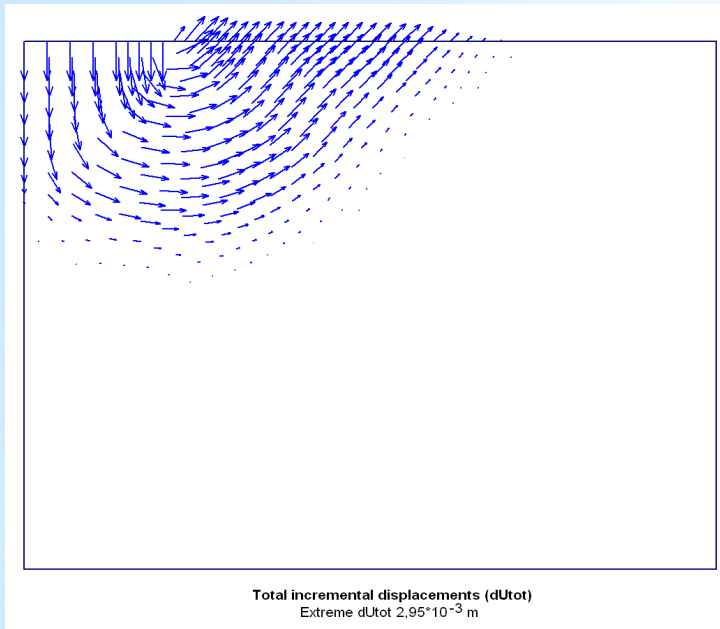


## C- Effet de la dilatance sur Mécanisme de rupture

On constate d'après les deux figures ci-dessous que le mécanisme de rupture (avec contact rugueux) obtenu à partir de l'incrément de déplacement total est similaire au mécanisme de rupture théorique sous une semelle filante tel qui est proposé par Terzaghi, avec la présence de trois blocs, ce qui confirme le bon choix des données et du modèle prise en compte dans notre simulation numérique.



Les deux figures ci-dessous nous montre le maillage déformé et aussi les vecteurs de l'incrément de déplacement dans le sol de fondation à la fin de la phase de chargement.



les vecteurs de l'incrément de déplacement dans le sol de fondation

le maillage déformé

## Exemple 2 : $\phi = \psi = 30^\circ$ :

### capacité portante

#### ▪ Contact Lisse :

$$Q_1 = F_y = 340 \text{ kN}$$

La contrainte limite (ou capacité portante par unité de surface) est :

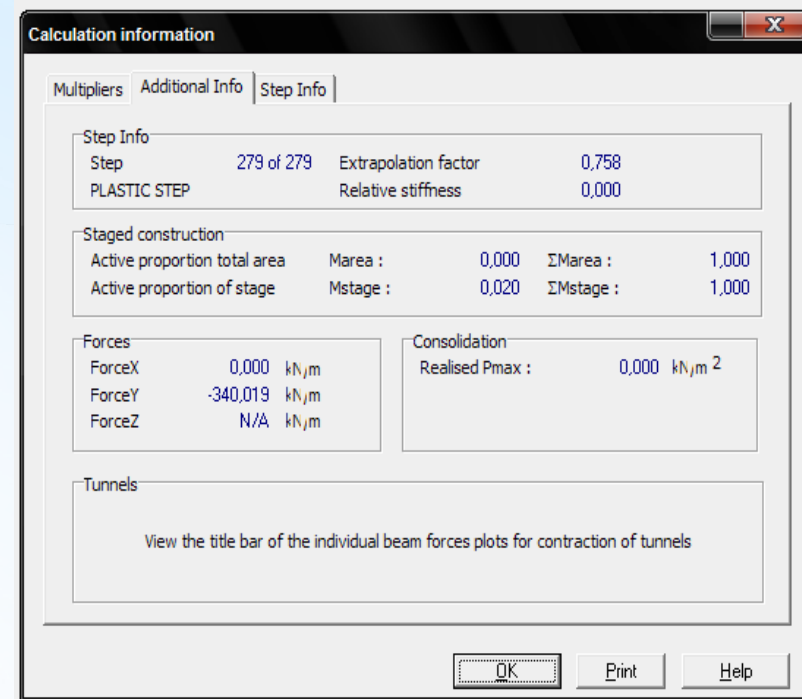
$$q_1 = Q_1 / (B \times L) = Q_1 / 1 \times 1 = -340 \text{ kN/m}^2$$

La valeur théorique est donnée par la relation

$$q_{th} = 337.7 \text{ kN/m}^2$$

Le pourcentage de l'erreur est 0.6%.

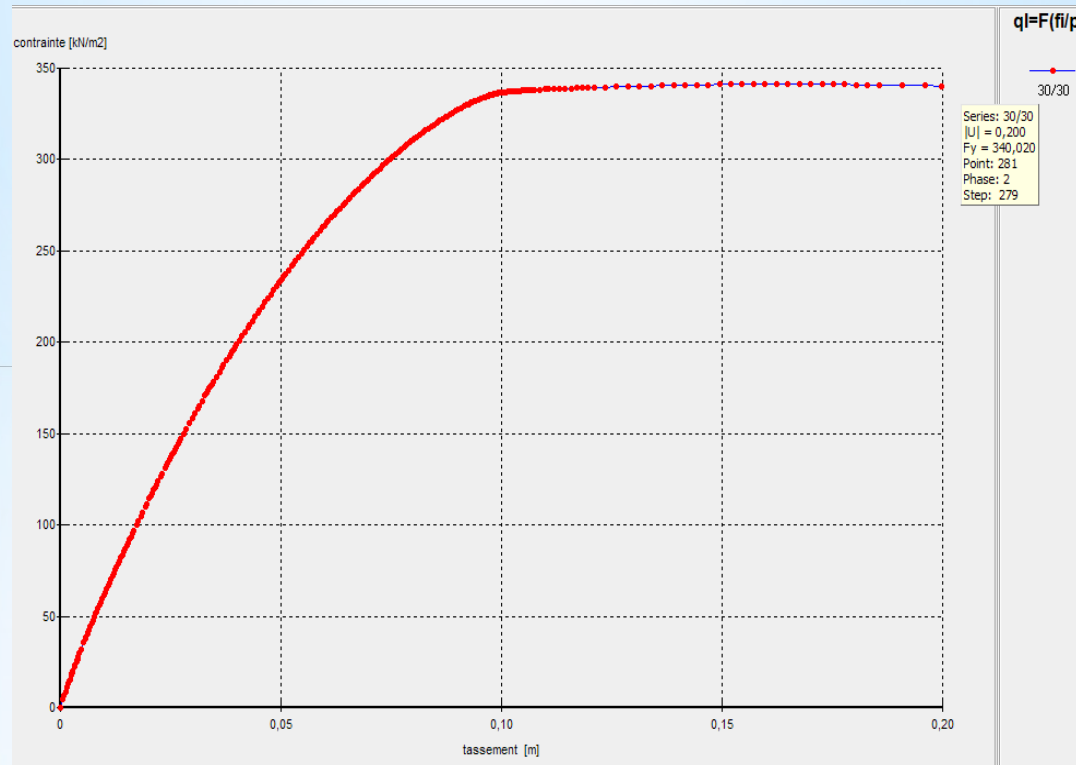
$$(q_{th} - q_{nu}) / q_{th} = (337.7 - 340) / 337.7 = -0.006 = -0.6\%$$



On constate une bonne concordance entre les résultats numériques obtenu par Plaxis et théoriques, d'après la formule de Terzaghi où le pourcentage de l'erreur est très faible 0.6%.

## B-Courbes charges-déplacements :

On constate que la courbe de la capacité portante en fonction des déplacements, (tassements) représente fidèlement le comportement élastoplastique du sol suivant le modèle décrit par le modèle de Mohr-Coulomb



Charge déplacement ( $\phi=\psi=30^\circ$ )

## Cas2-Sol moyennement dilatant ( $\psi \leq \phi$ ).

En deuxième lieu, on s'intéresse au cas des sols moyennement dilatant ( $\psi < \phi$ ) et on teste l'influence de la dilatance sur la capacité portantes et aussi sur les mécanismes de rupture.

Pour atteindre ce but, on fixe la valeur et l'angle de frottement interne  $\phi=30^\circ$  et on fait varier l'angle de dilatance  $\psi$  sur un intervalle de valeurs ( $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \text{ et } 30^\circ$ )

Les résultats obtenus numériquement par Plaxis sont résumés dans le tableau

$\phi$ ( $^\circ$ )	30			
$\psi$ ( $^\circ$ )	0	10	20	30
q (KN/m <sup>2</sup> )	306.308	321.160	332.423	340.020

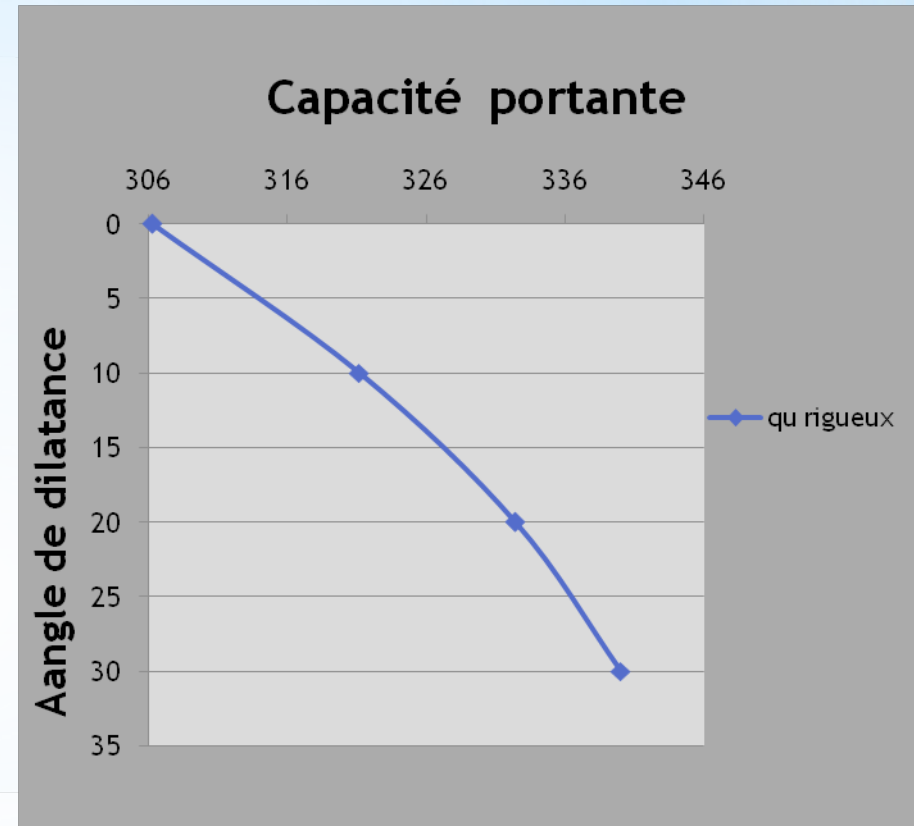
**Valeur de capacité portante en fonction de ( $\psi$ ) rugueux**



## ➤ Effet de la dilatance sur la capacité portante

On constate d'après la courbe que la capacité portante dépend directement de l'angle de dilatance, et plus la dilatance diminue plus la capacité portante diminue également, en remarque que l'écart entre un cas purement dilatant  $\psi = \phi = 30^\circ$  et un cas pour le cas  $\psi = (\phi/3) = 10^\circ$ , la valeur de la capacité portante passe de 340 à 321, soit une diminution de 5.5% et atteint 10% pour le cas ou  $\psi = 0^\circ$ .

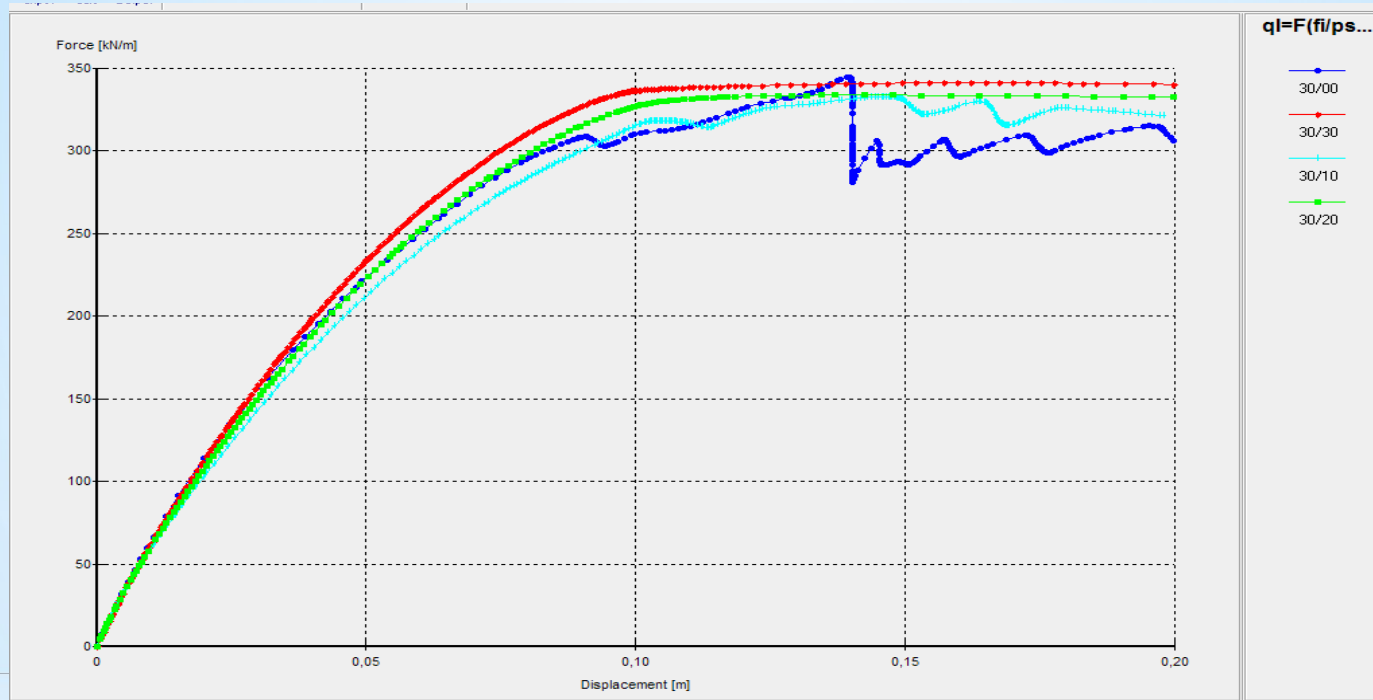
Cela signifie que l'effet de la dilatance est bien réel et que la valeur de la capacité portante est surestimé d'une valeur max de 10% dans les calculs actuelle en géotechnique



Capacité portant en fonction de la dilatance ( $\psi$ ) pour un contact rugueux

## ➤ Courbe charge -déplacement

Les courbes de charge déplacement pour un contact rugueux pour différentes valeurs sont regroupés dans la figure ci-dessous.



Capacité portante- déplacement pour un contact rugueux

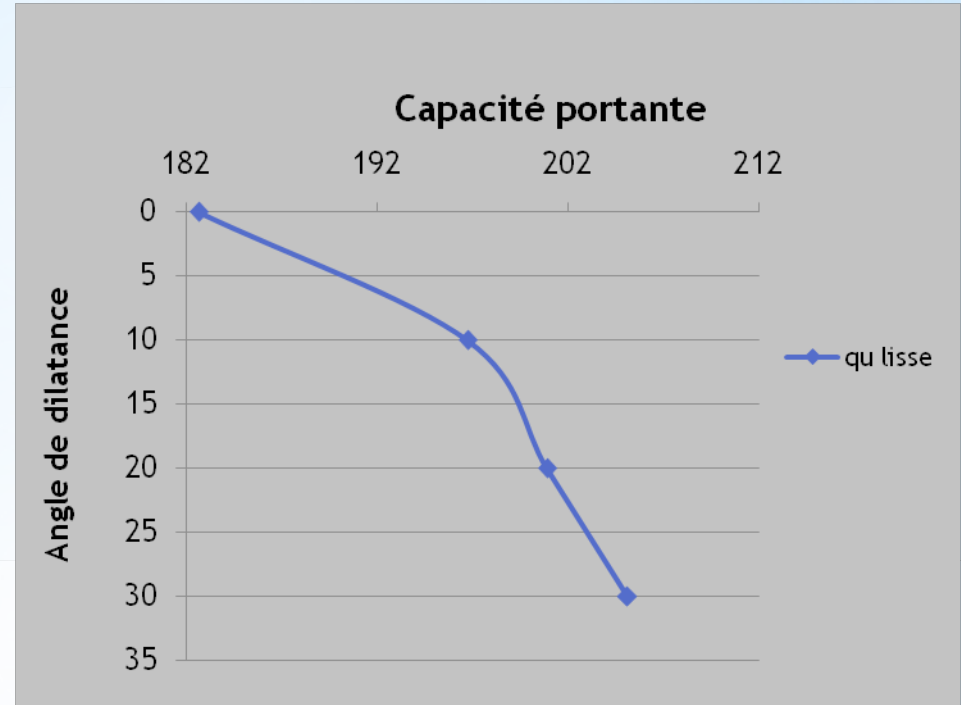
**Cas d'un contact Lisse :**

**Les Valeurs de capacité portante en fonction de ( $\psi$ ) lisse obtenus numériquement par Plaxis sont résumés dans le tableau**

$\phi$ (°)	30			
$\psi$ (°)	0	10	20	30
Q(lisse) (KN/m <sup>2</sup> )	182.669	196.743	200.920	205.102

**Valeur de capacité portante en fonction de ( $\psi$ ) lisse**

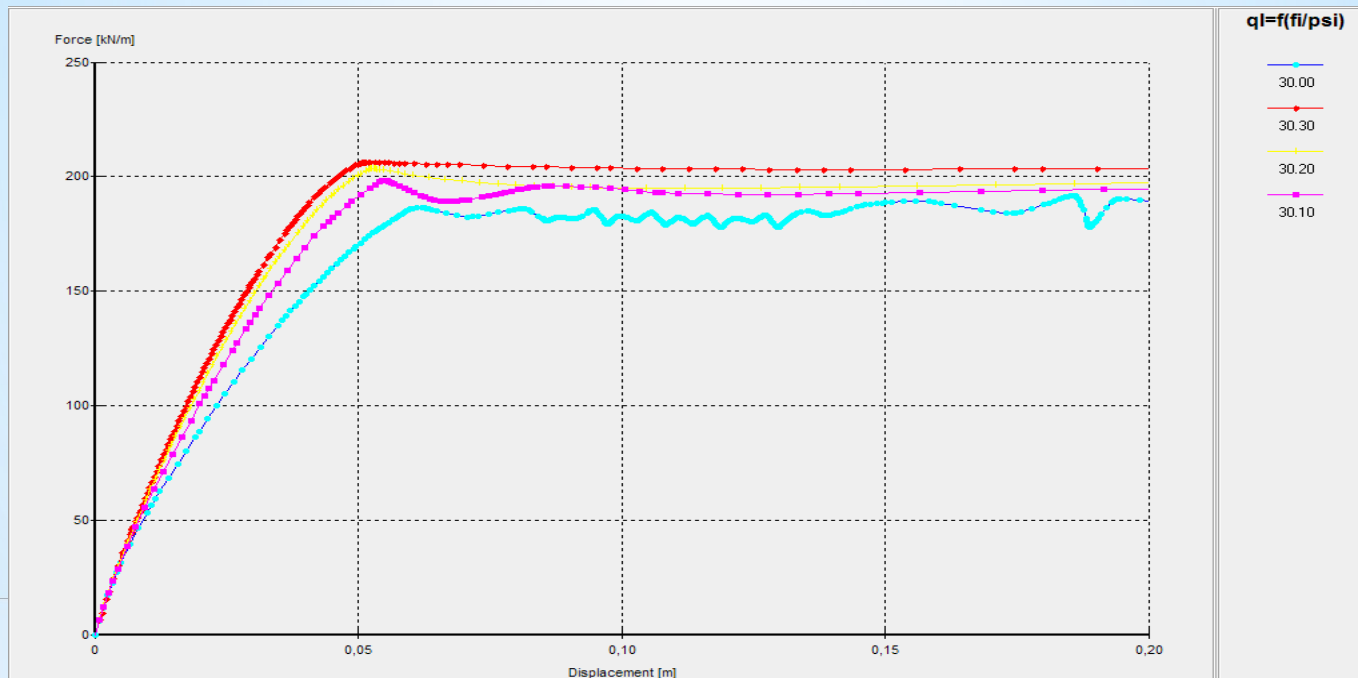
**On constate, que le type de contact à une influence significative sur les valeurs de capacité portante. Pour le cas d'un sol purement dilatant  $\phi=\psi=30$ , cet écart peut attendre 39.7%, entre la valeur avec contact lisse et celle obtenue par contact rugueux.**



**Capacité portant en fonction de la dilatance ( $\psi$ ) pour un contact lisse**

## ➤ Courbe charge -déplacement pour un contact lisse

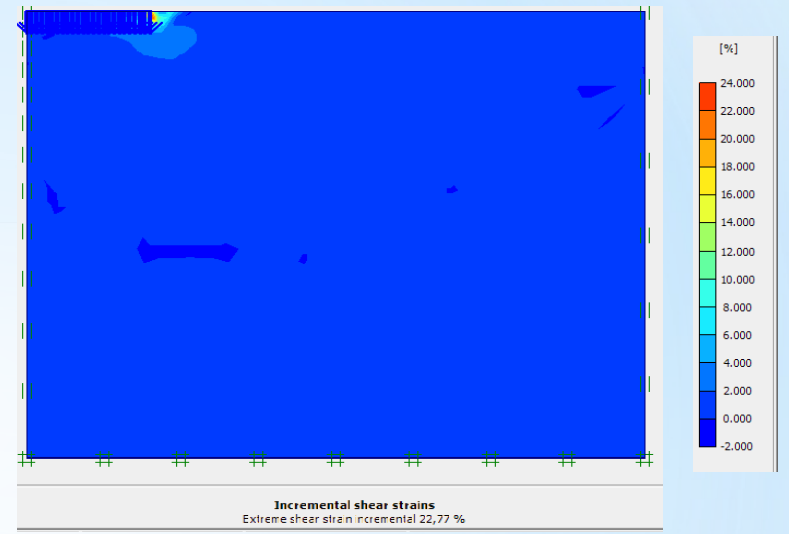
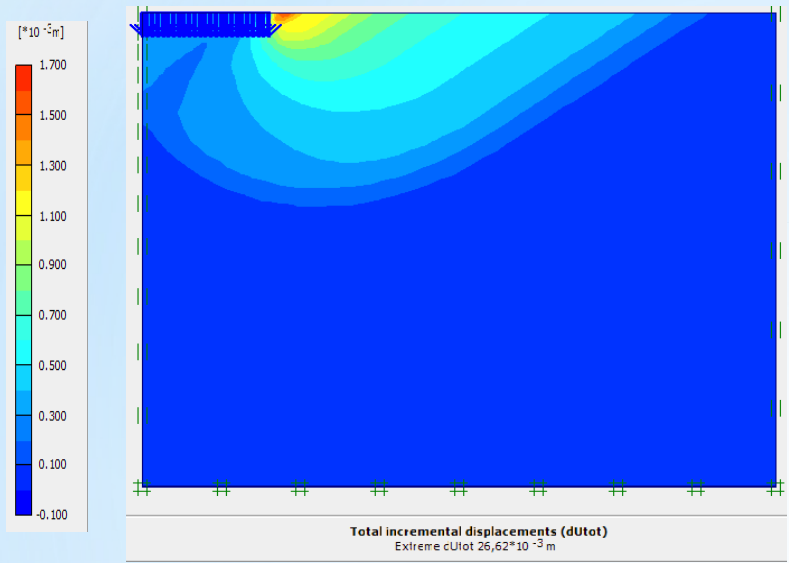
Les courbes de charge déplacement pour un contact lisse pour différentes valeurs sont regroupés dans la figure ci-dessous.



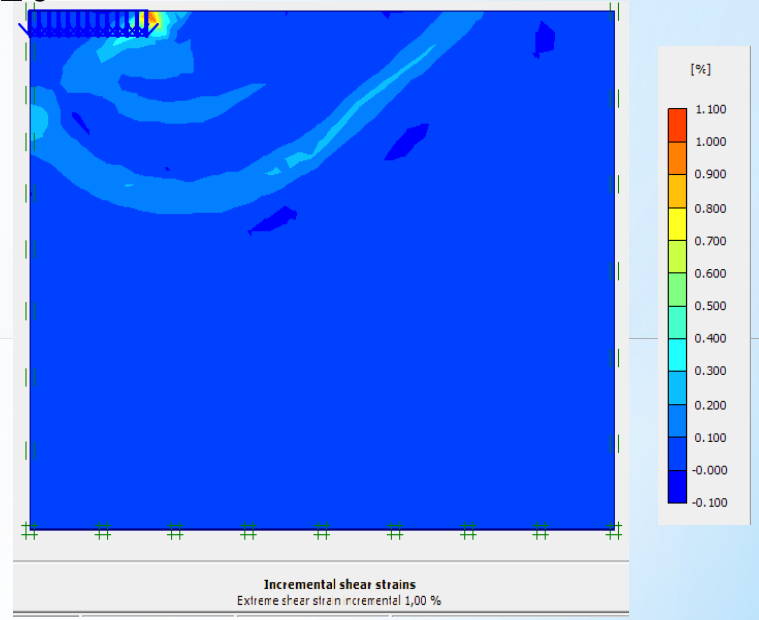
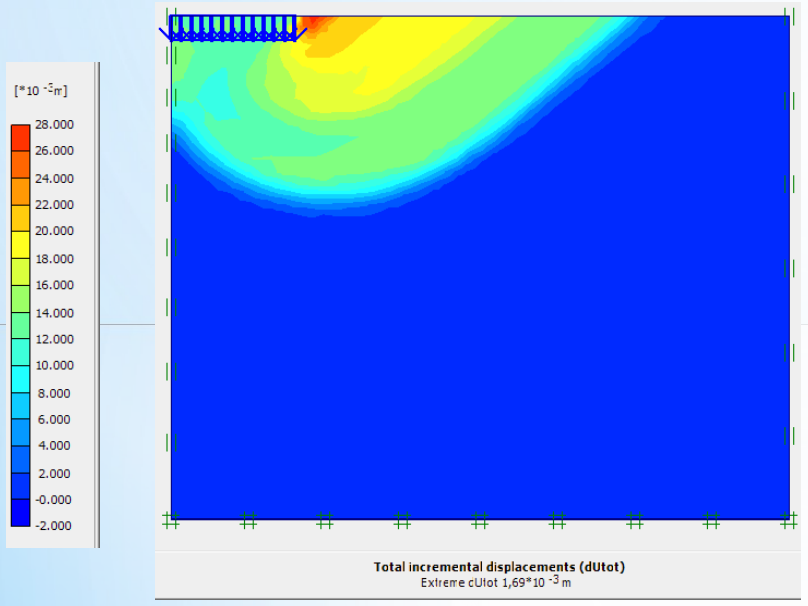
**Capacité portante- déplacement pour un contact lisse**



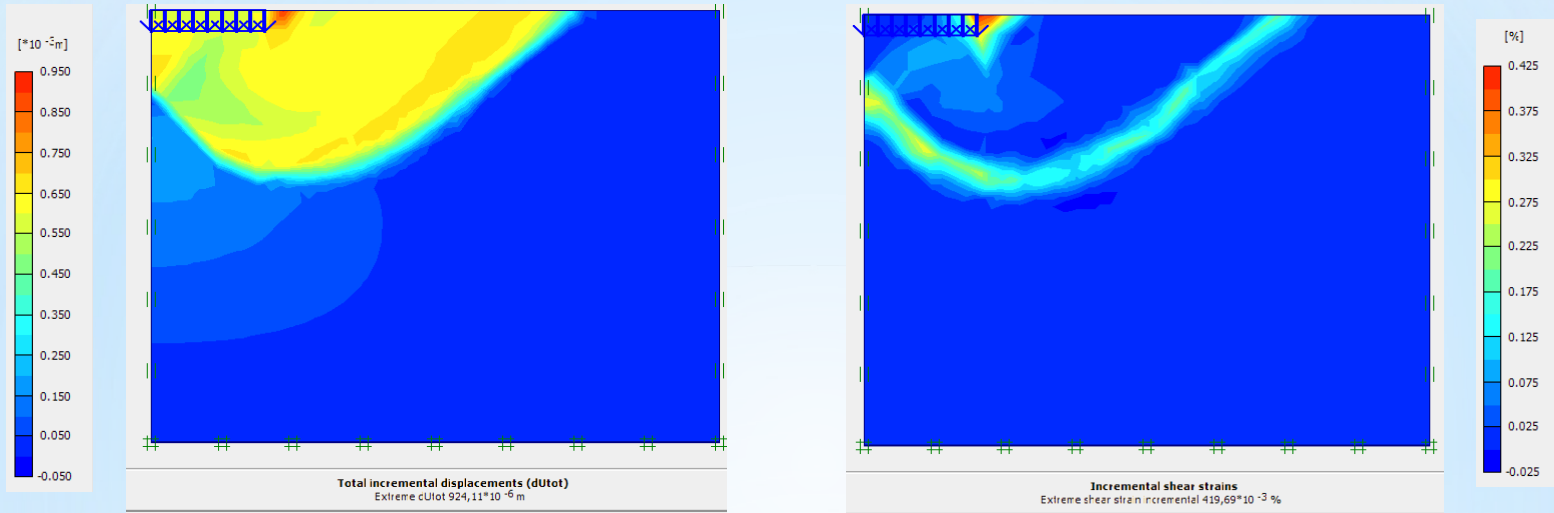
# ➤ Effet de la dilatance sur les mécanismes de rupture :



$\phi=30^\circ$  et  $\psi=20^\circ$



$\phi=30^\circ$  et  $\psi=10^\circ$



$$\phi=30^\circ \text{ et } \psi=0$$

**A partir des figures, on remarque que les zones de rupture se rétrécit avec la diminution de l'angle de dilatance, par contre la forme du mécanisme reste toujours la même, semblable à celle du mécanisme de rupture sous une fondation superficielle, décrit par Terzaghi. On constate aussi que sur les mécanismes schématisés par les incréments de déformation de cisaillement, l'existence de zones de cisaillement et sont représentées par des bandes de cisaillement et qui varient en fonction de la dilatance, ce qui en conformité avec les schémas théoriques.**

## *Colusion*

**Nous avons traité dans cette étude l'un problème le plus répondu dans le domaine de la mécanique des sols et qui est l'évaluation de la capacité portante des fondations superficielle.**

**A travers une étude paramétrique, nous avons vérifié l'influence de la dilatance du sol, représentée par un angle de dilatance ( $\psi$ ) sur la capacité portante, et aussi sur l'évolution des mécanismes de ruptures engendrés dans le sol de fondation.**

**On a abouti aux résultats suivant :**

- Le cas classique d'un sol purement dilatant ou ( $\phi=\psi$ ) est conforme aux résultats de théoriques de Terzaghi.**
- Le mécanisme de rupture correspondant est similaire au mécanisme de rupture sous une semelle filante tel qui est proposé par Terzaghi, avec la présence de trois blocs.**
- La capacité portante pour le cas moyennement dilatant ( $\psi \leq \phi$ ) dépend de l'angle de dilatance, elle diminue avec elle, ce qui montre que le calcul classique surestime la valeur réelle de la capacité portante d'une valeur max de 10%.**
- Les zones de ruptures dans les mécanismes de ruines rétrécis en fonction de la dilatance.**

**Cette étude nous a permis de confirmer l'influence de dilatance et la nécessité de l'introduire dans les règlements de calcul géotechniques dans les versions futures.**



A scenic view of a snow-capped mountain range under a blue sky with scattered white clouds. The foreground is filled with dense evergreen trees, some covered in snow. The mountains in the background are rugged and partially covered in snow, with some peaks appearing more distant and hazy. The overall atmosphere is bright and clear.

**Merci de votre  
Attention**