

Module TASSELDO : Calcul 3D des déplacements et contraintes dans un massif de stratigraphie quelconque

M.T. Hoang & F. Caira  
Terrasol

# Principales nouveautés de Tasseldo+

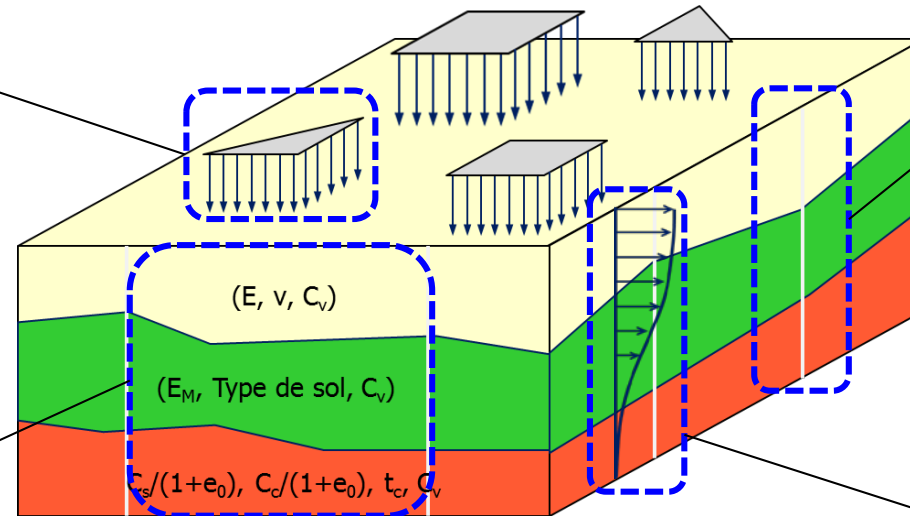
- Charge rectangulaire et/ou **triangulaire**

- Assistance de modélisation d'un **polygone convexe**

- Comportement défini **par couche**

- Calage automatique des modules de déformation à partir du pressiomètre (**courbes dégradation**)

- Calcul de **consolidation** intégré avec ou sans systèmes de drains verticaux



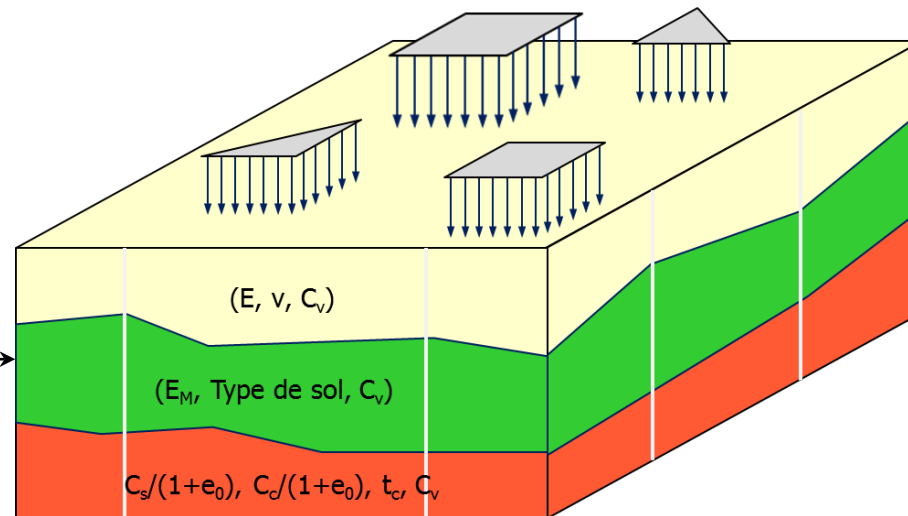
- Modélisation 3D d'une **stratigraphie complexe** à l'aide d'un réseau de sondages

- Accès aux contraintes et déplacements dans les **trois directions** de l'espace

# Position du problème

## INPUT

- ❑ Chargement (en surface et/ou en profondeur)
- ❑ Profil stratigraphique (défini par couche ou par sondage)
- ❑ Comportement et paramètres de calcul définis par couche
- ❑ Point de calcul

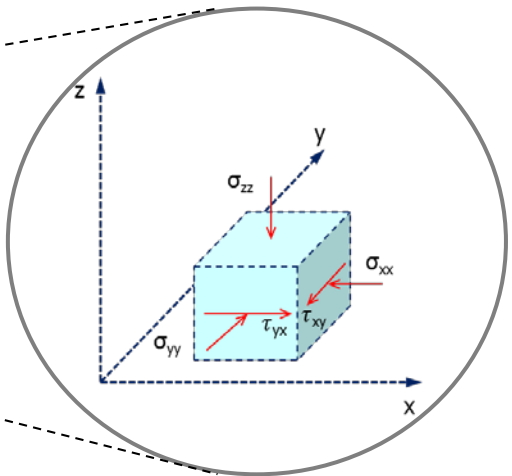
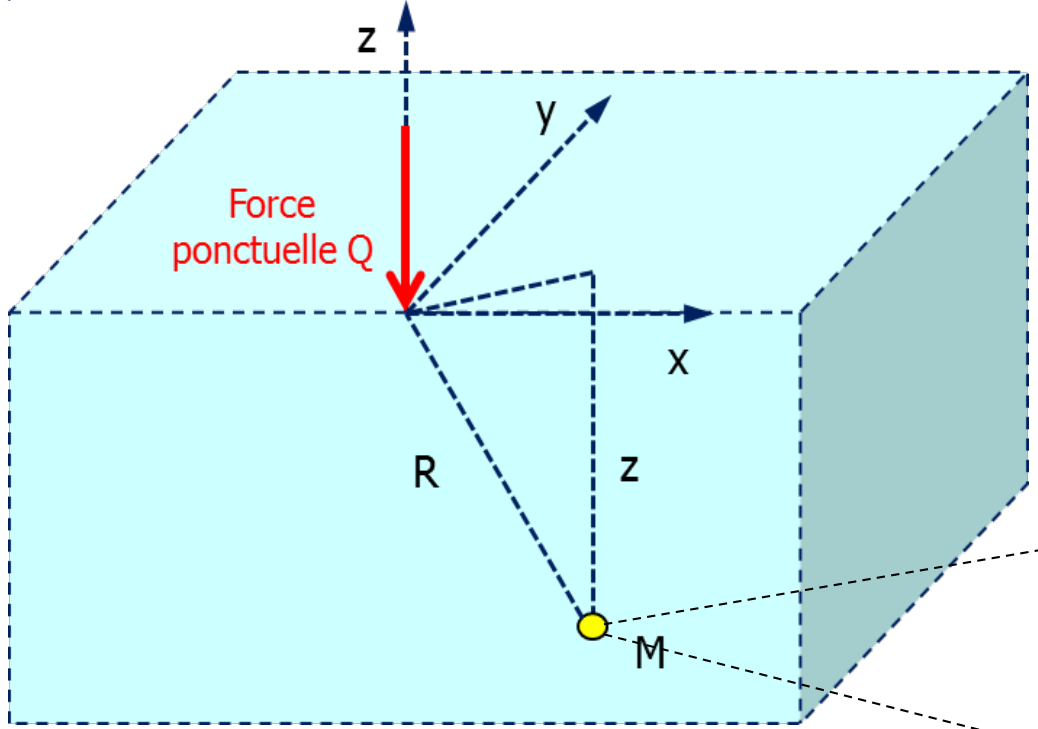


## OUTPUT

- ❑ **Contrainte**
  - ❑ Contrainte verticale effective initiale,
  - ❑ Supplément de la contrainte verticale, des contraintes horizontales
- ❑ **Modèle stratigraphique 3D** (profil de terrain au droit des points de calcul)
- ❑ **Tassement et déplacements horizontaux**
- ❑ **Tassement et degré de consolidation.**

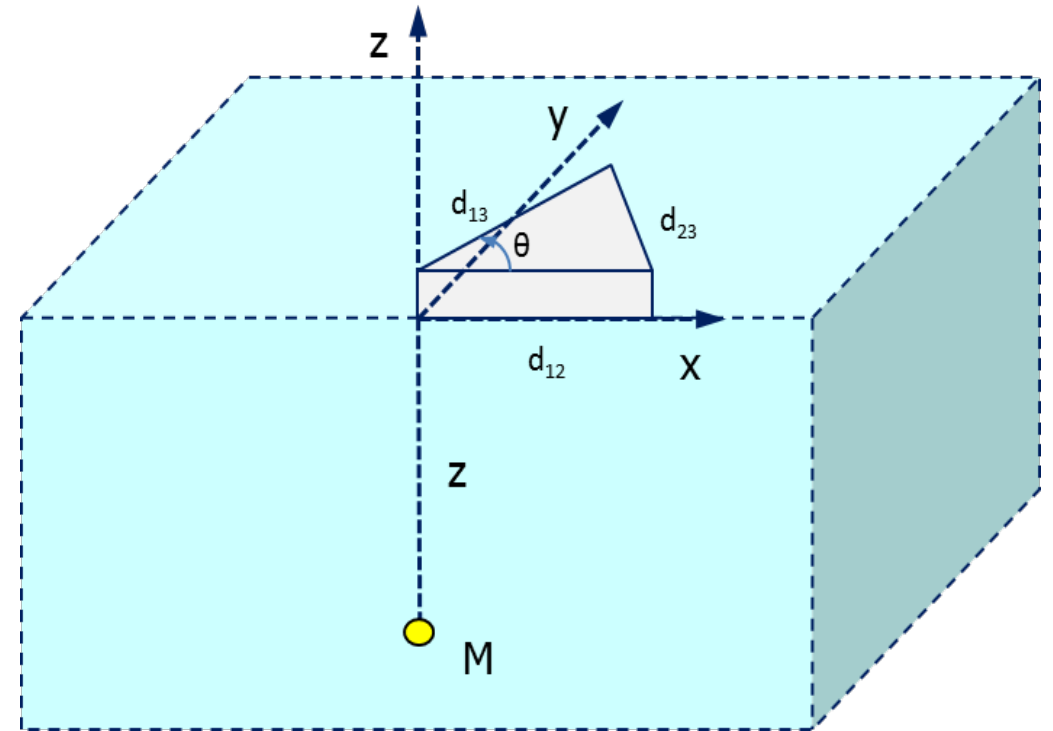
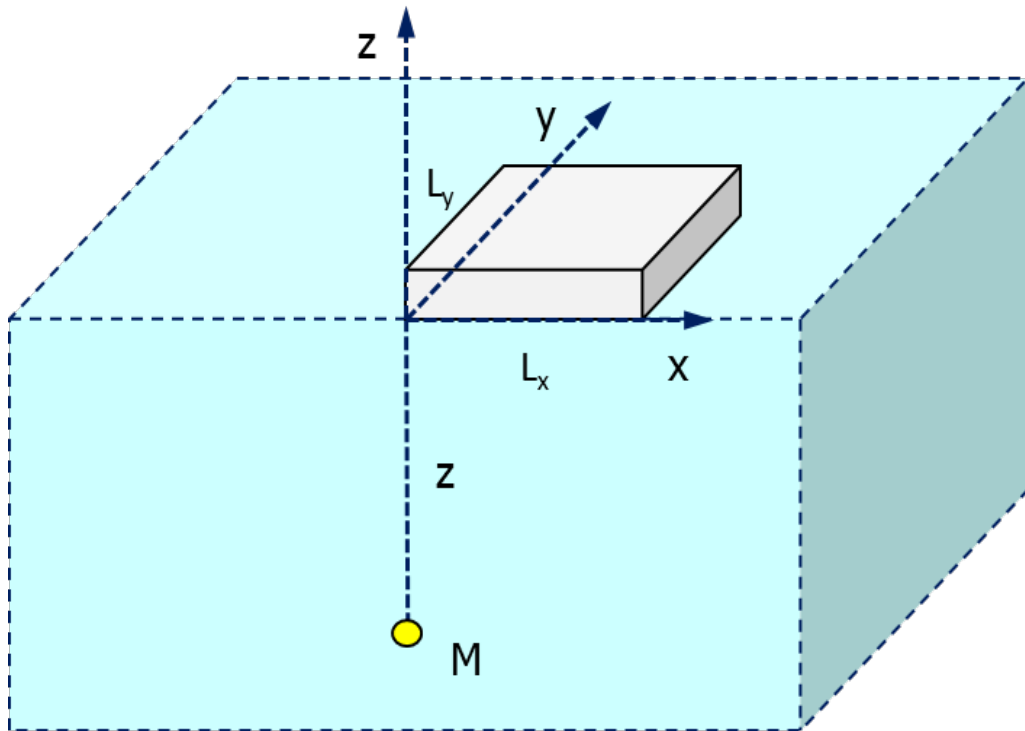
# Contraintes

- Modèle de Boussinesq : La variation des contraintes induite par le chargement  $Q$  à la surface en tout point  $M(x, y, z)$



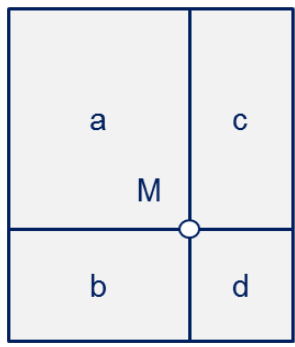
# Contraintes

- Dans Tasselto : utilisation de solutions intégrales sous le coin d'une charge rectangulaire ou triangulaire

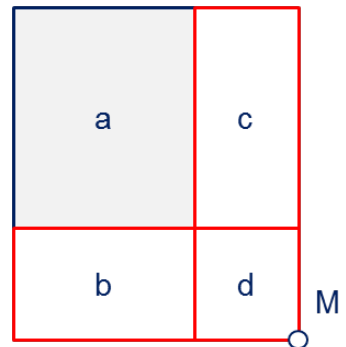


# Contraintes

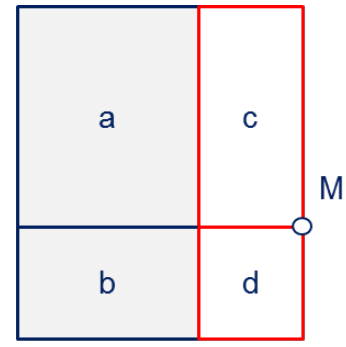
## ☐ Méthode de superposition



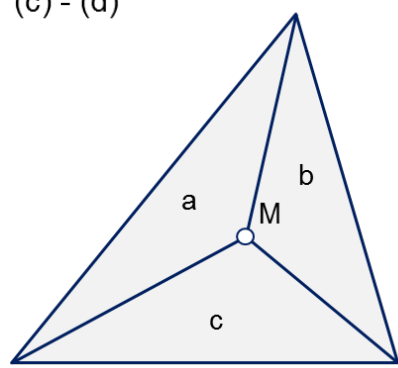
(1)  
 $(M) = (a) + (b) + (c) + (d)$



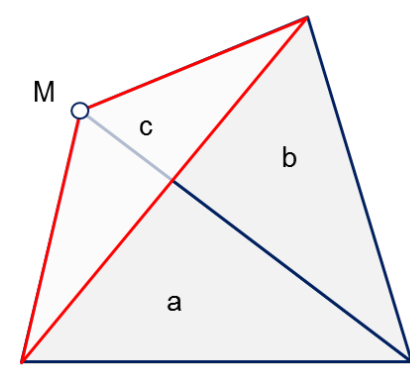
(2)  
 $(M) = (a+b+c+d) - (b+d) - (c+d) + (d)$



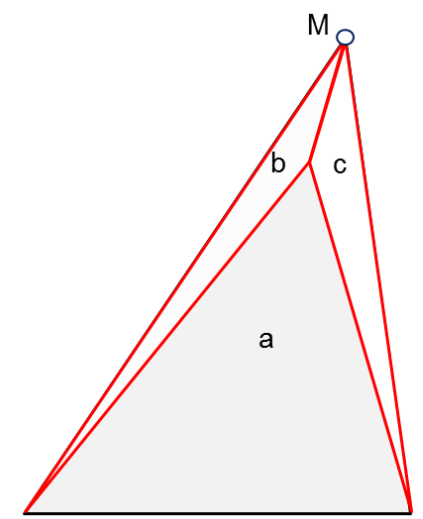
(3)  
 $(M) = (a+c) + (b+d) - (c) - (d)$



(1)  
 $(M) = (a) + (b) + (c)$



(2)  
 $(M) = (a) + (b) - (c)$



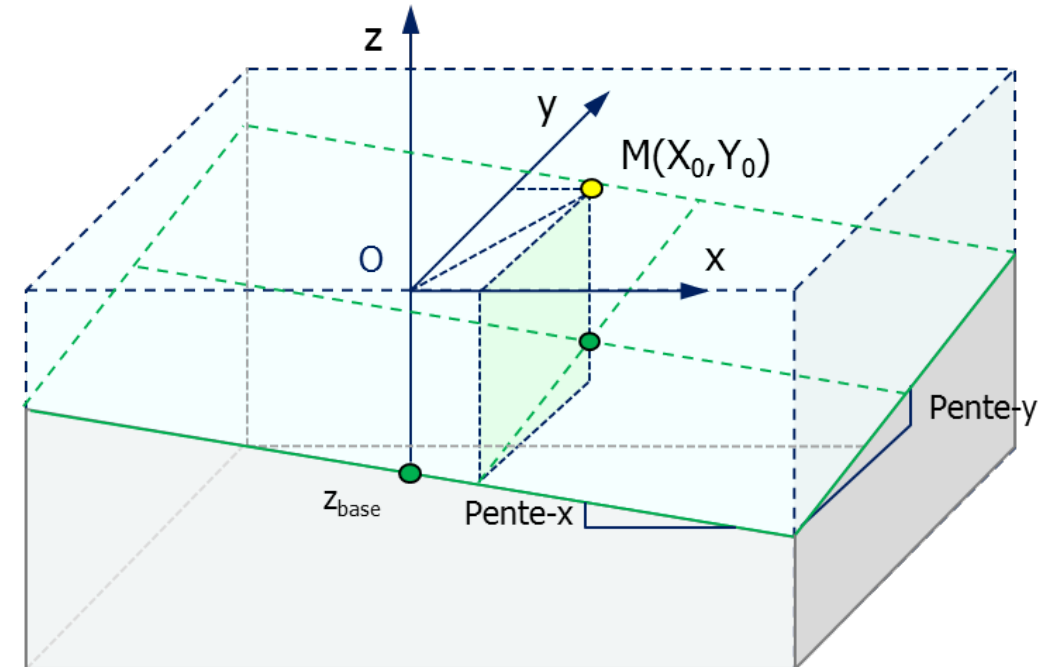
(3)  
 $(M) = (a) - (b) - (c)$

# Modèle stratigraphique

## ❑ Modèle défini par couche

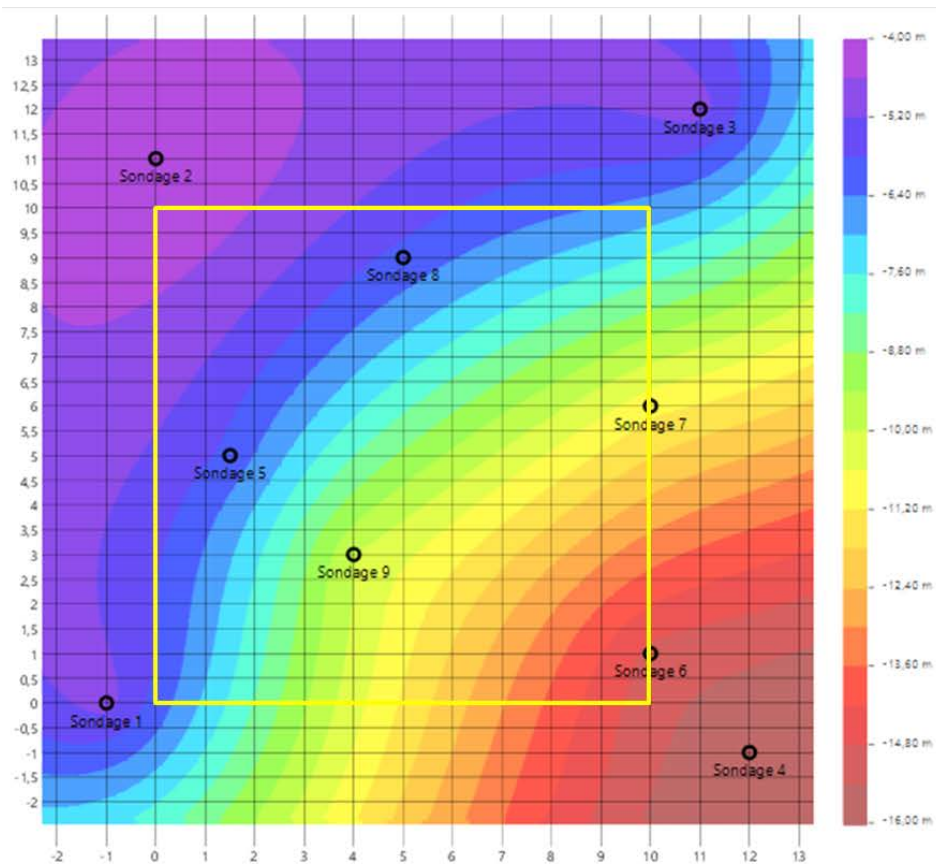
- ❑  $z_{\text{base}}$  : cote de la base de la couche définie à l'origine du repère global,
- ❑ Pente-x : pendage de la base de la couche selon X,
- ❑ Pente-y : pendage de la base de la couche selon Y.

$$z_M = z_{\text{base}} - X_0 \times \text{Pente-x} - Y_0 \times \text{Pente-y}$$

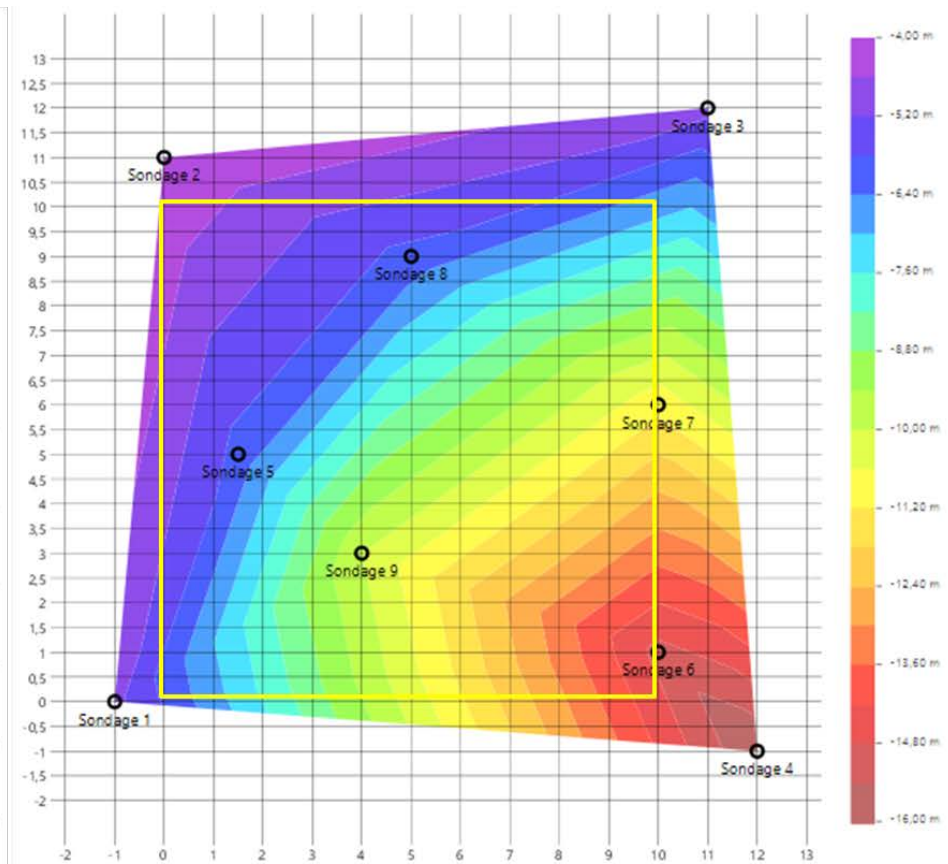


# Modèle stratigraphique

☐ Modèle défini par sondage



Interpolation par fonction radiale de type linéaire (interpolation radiale)

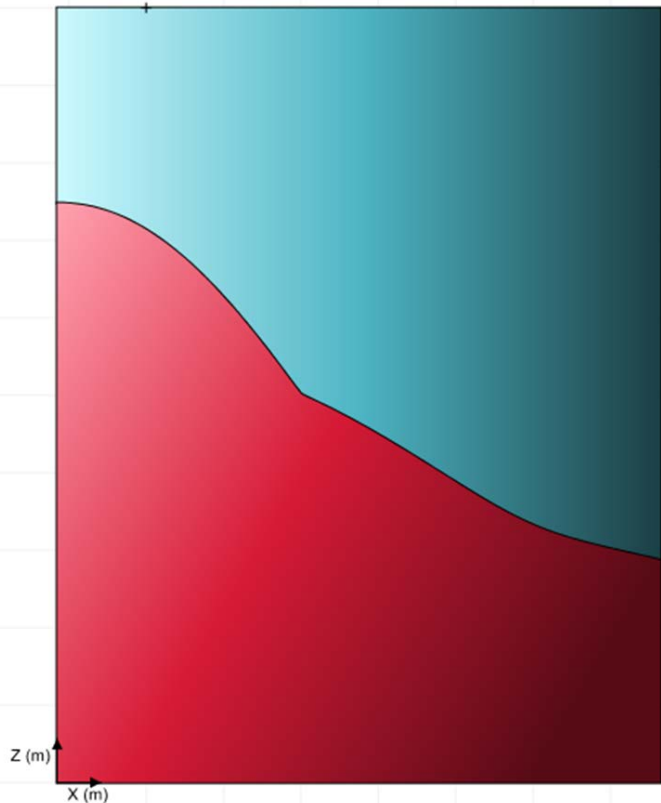


Interpolation linéaire à partir de la triangulation de Delaunay (interpolation surfacique)

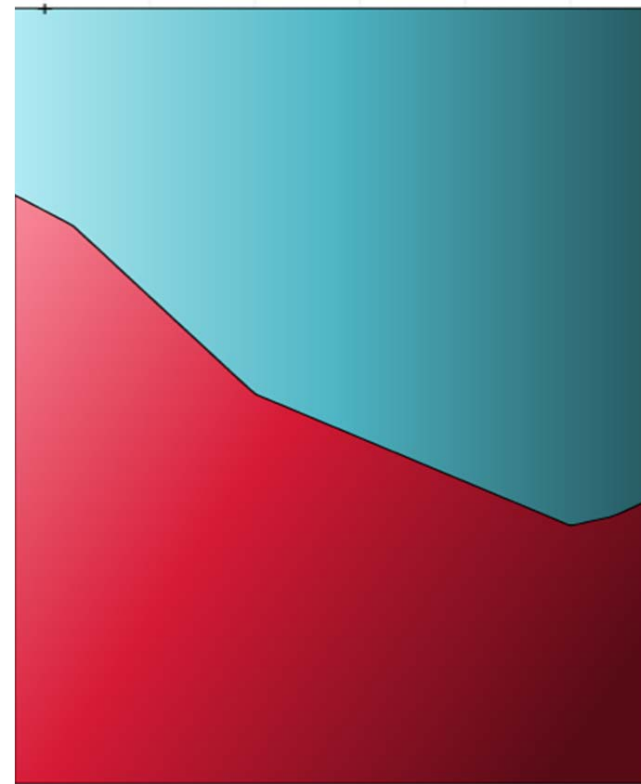


# Modèle stratigraphique

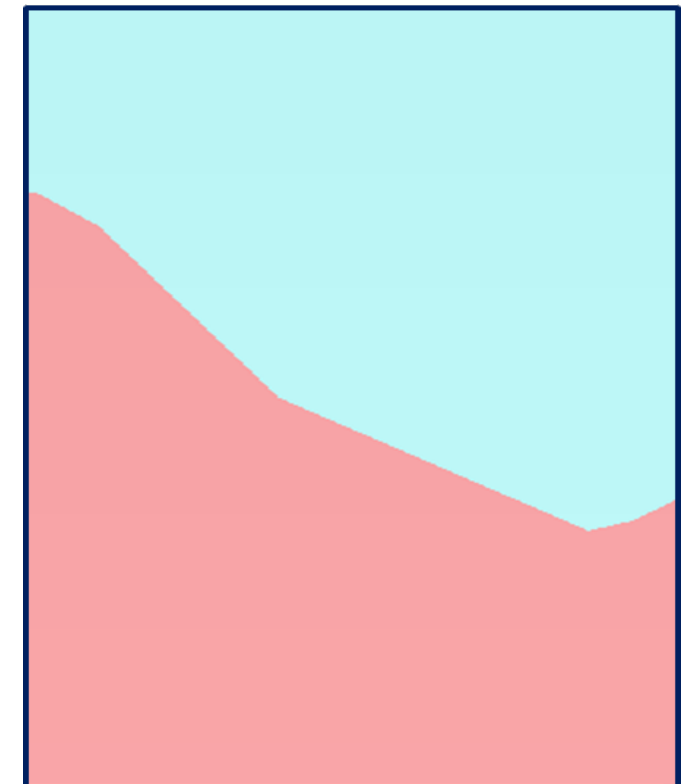
☐ Modèle défini par sondage



Interpolation par fonction radiale de type linéaire (interpolation radiale)



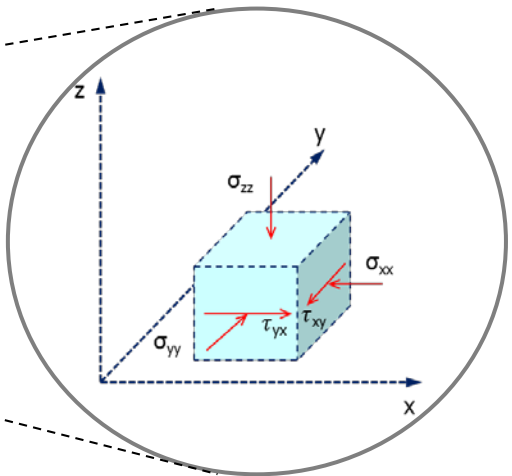
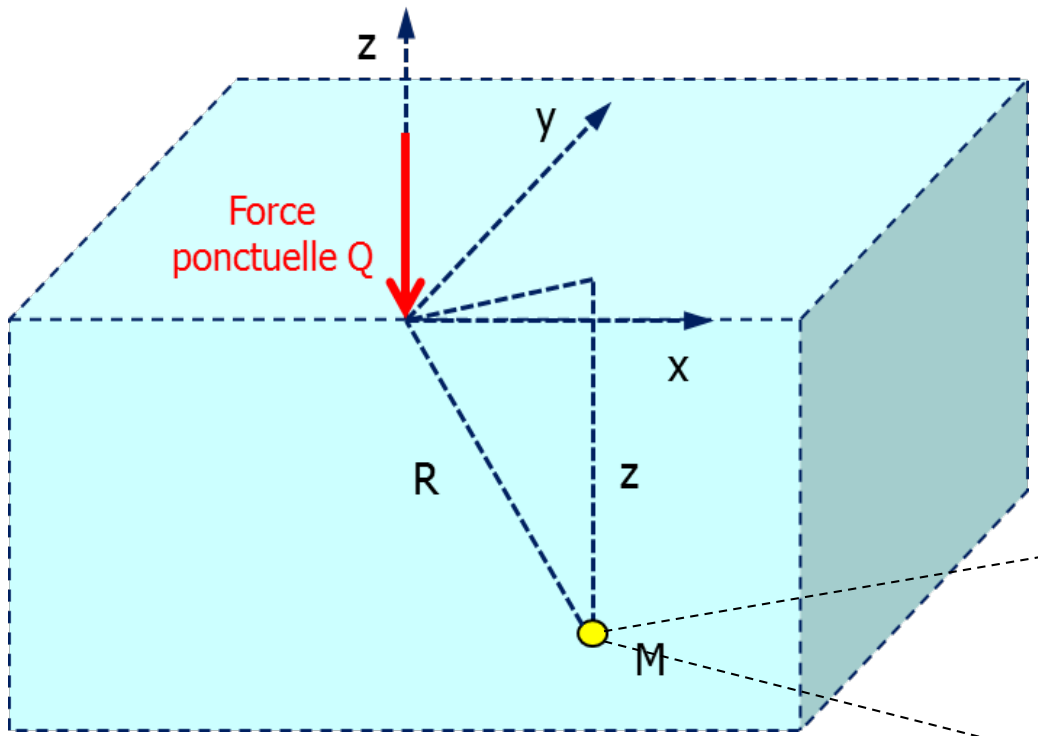
Interpolation linéaire à partir de la triangulation de Delaunay (interpolation surfacique)



Plaxis 3D

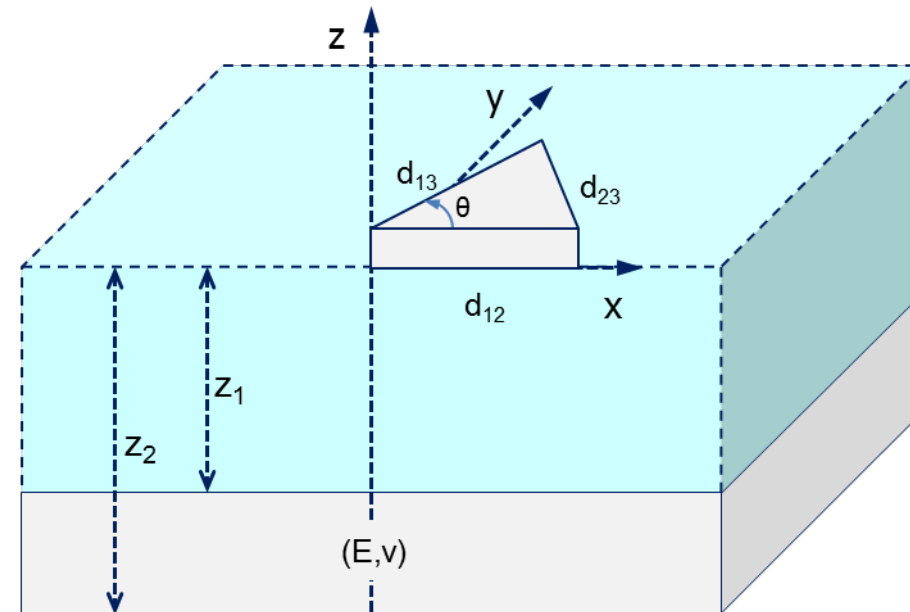
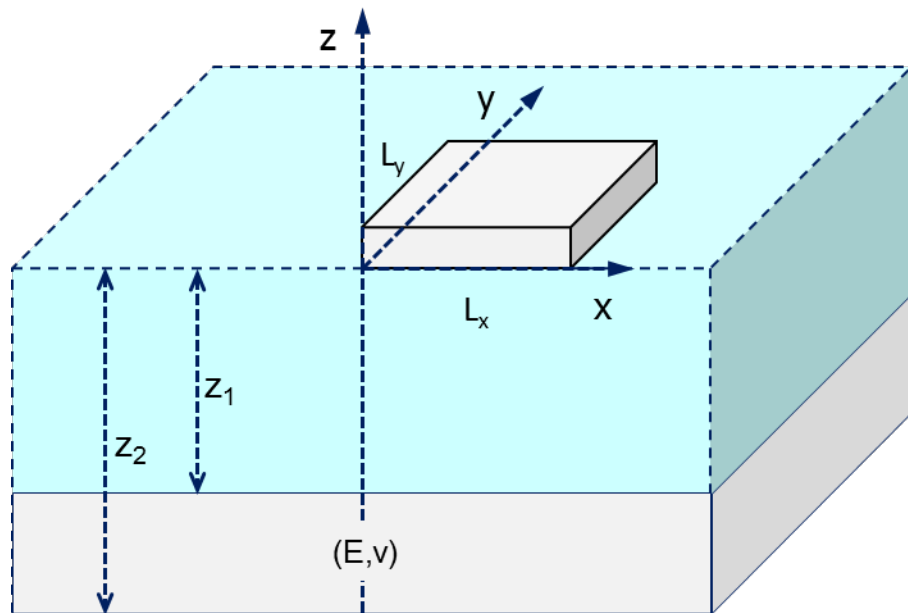
# Tassement et déplacements horizontaux

□ Modèle de Boussinesq : Les déplacements induits par le chargement  $Q$  à la surface en tout point  $M(x, y, z)$



# Tassement et déplacements horizontaux

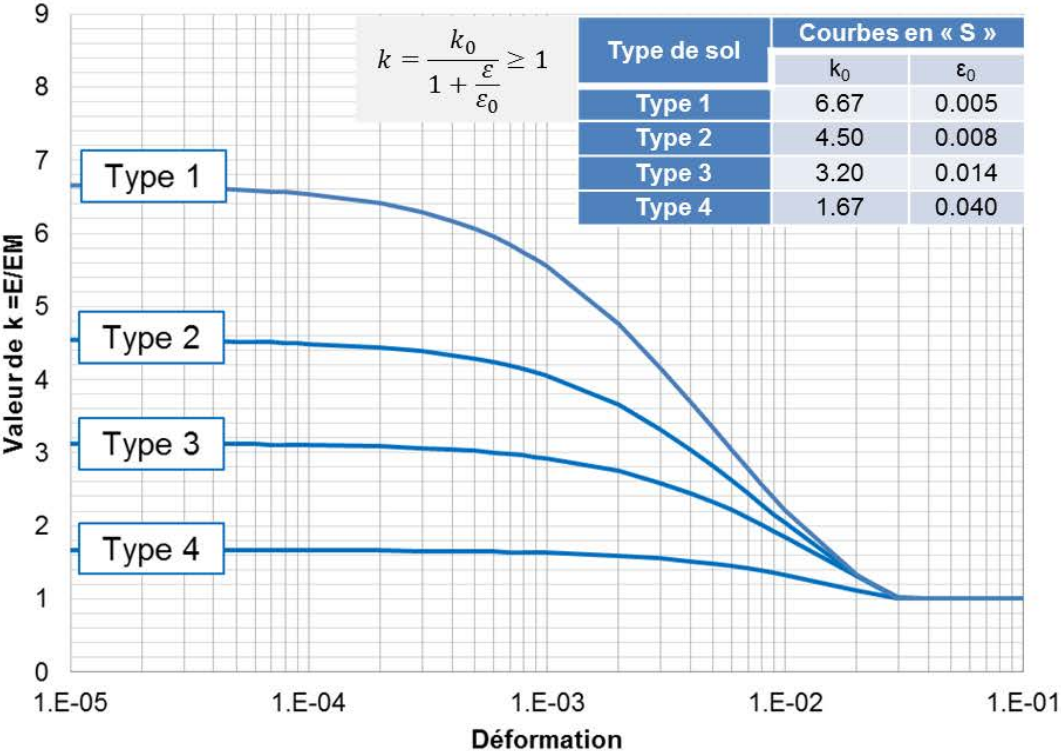
- Dans Tasselto : utilisation de solutions intégrales sous le coin d'une charge rectangulaire ou triangulaire



# Tassement et déplacements horizontaux

☐ Tassement élastique non linéaire : Notion de la dégradation du module de déformation

$$\frac{E}{E_M} = k(\varepsilon) = \frac{k_0}{1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}$$

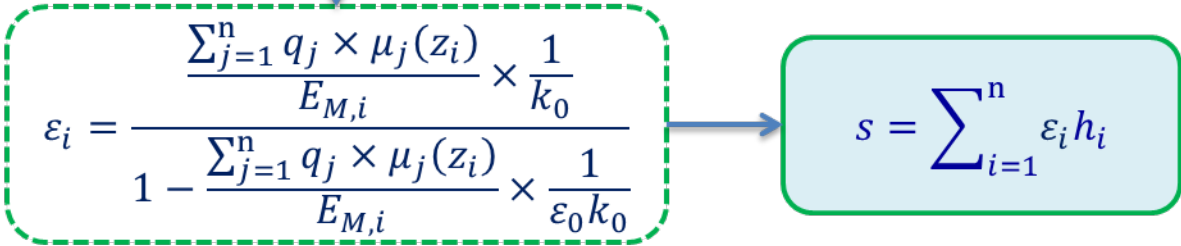
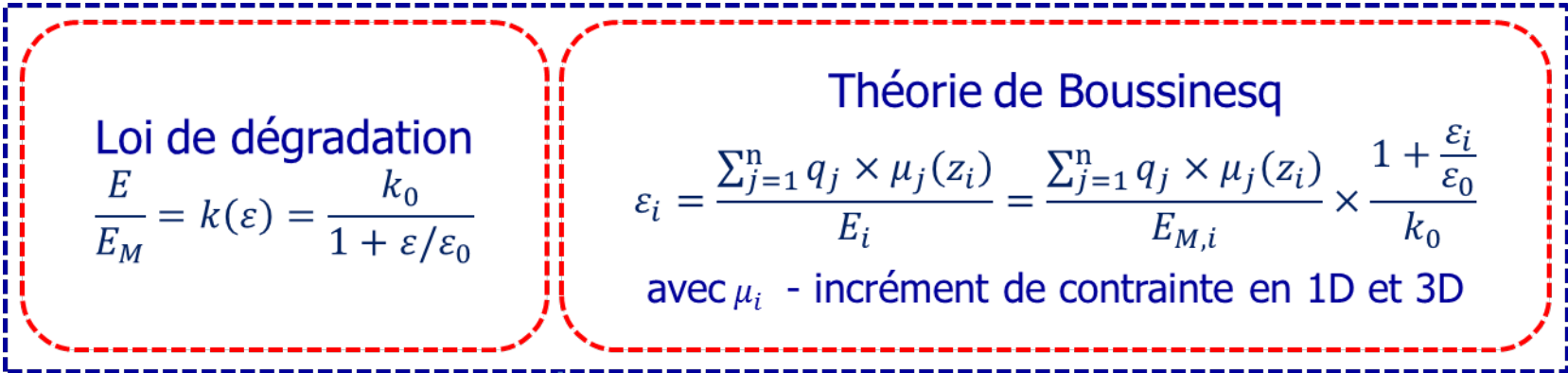


Type de sol	Type
Sables, sables graves Roche très fracturée	1
Sables, sables graves serrés Limons	2
Argiles Roche peu fracturée	3
Argiles, limons, marnes surconsolidés	4

(PN ARSCOP, 2018)

# Tassement et déplacements horizontaux

□ Tassement élastique non linéaire : mise en œuvre du modèle de calcul



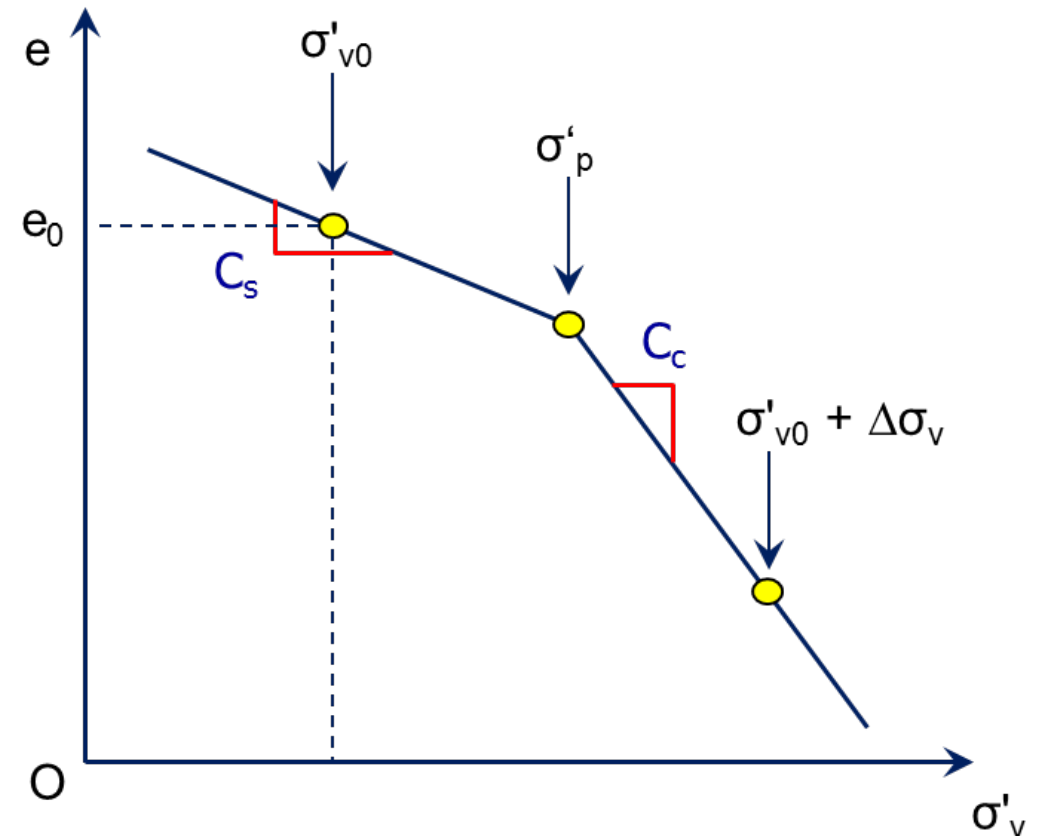
Mise en œuvre d'un modèle élastique non-linéaire simplifié

# Tassement et déplacements horizontaux

## □ Tassement œdométrique

$$\Delta e = C_s \log_{10} \left( \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \right) + C_c \log_{10} \left( \frac{\sigma'_{v0} + \Delta \sigma_v}{\sigma'_p} \right)$$

$$s = \sum_{\text{couches}} \varepsilon_i h_i = \sum_{\text{couches}} \frac{\Delta e}{1 + e_0} h_i$$



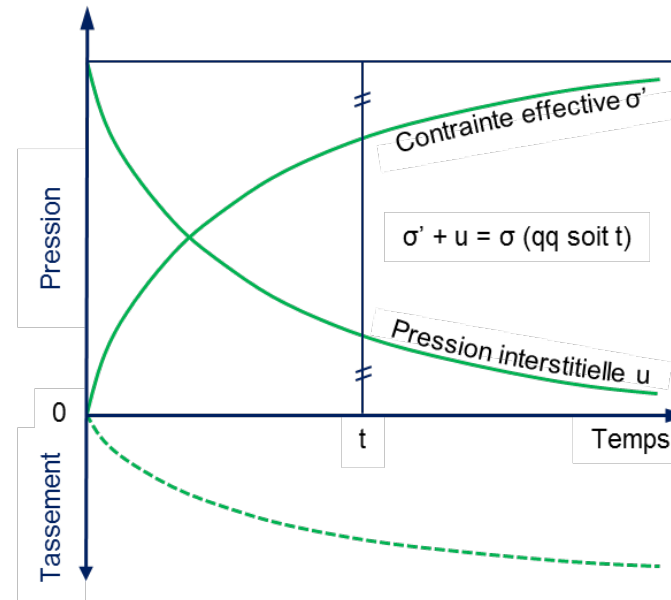
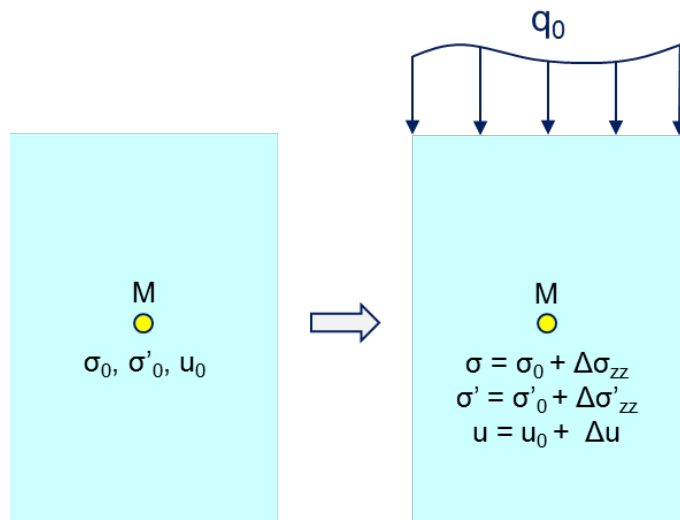
# Consolidation

□ Théorie de la consolidation verticale

$$\frac{\partial(\Delta u)}{\partial t} = C_v \cdot \frac{\partial^2(\Delta u)}{\partial z^2} \Leftrightarrow \boxed{\frac{1}{E_{oed}} \frac{\partial(\Delta u)}{\partial t}} = \boxed{\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial(\Delta u)}{\partial z} \right)} \quad \left( C_v = \frac{k E_{oed}}{\gamma_w} \right)$$

Traité par différences finies

Résolution par éléments finis



# Consolidation

❑ Théorie de la consolidation radiale : Le degré de consolidation globale X

$$X = 1 - (1 - X_v)(1 - X_r)$$

Avec

$$X_r = 1 - e^{-t/c}$$

Où :

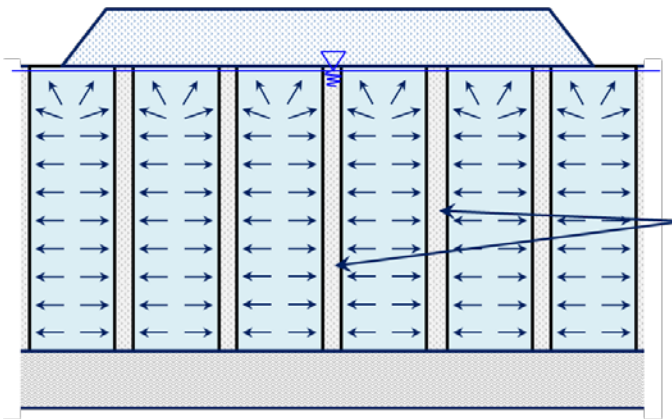
$$c = \frac{D_m^2}{c_r} \left( \frac{\ln(n)}{8(1 - n^{-2})} - \frac{3 - n^{-2}}{32} \right)$$

$D_m$  : le diamètre équivalent de la maille

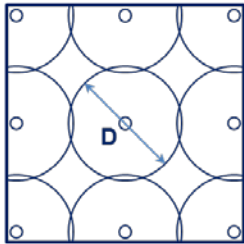
$D_{\text{éq}}$  : le diamètre équivalent du drain

$$n = D_m / D_{\text{éq}}$$

$c_r$  le coefficient de consolidation radiale.

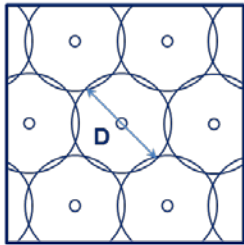


Diamètre équivalent de la maille



L

Carré  $D = 1,13L$



L

Triangulaire  $D = 1,05L$

Drains





Foxta v4  
**TASSELDO**

Prise en main

M.T. Hoang & F. Caira  
Terrasol

# Onglet « Couches »

Paramètres Couches Comportement Charges Consolidation Calcul

### Données des couches

Mode de définition de la stratigraphie: **Par couches de sol**

Définition des couches de sol

Toit de la première couche (m): 10,00

Contrainte verticale effective appliquée au toit de la première couche  $\sigma_{v0}$  (kPa): 5,00

Cote de la nappe  $Z_w$  (m): 7,00

N°	Nom	Couleur	$Z_{base}$ [m]	Pente-x	Pente-y	n
1	Couche 1		5,00	0,00	0,00	50
2	Couche 2		0,00	0,00	0,00	20
3	Couche 3		-10,00	0,00	0,00	10

Modèle défini par couche avec pendage

Nb de couches : 3  
Nb de découpages : 80

Base de données

Configurer le D.I. Lancer le calcul Voir les résultats

Paramètres Couches Comportement Charges Consolidation Calcul

### Données des couches

Mode de définition de la stratigraphie: **Par sondages**

Définition des sondages

N°	Nom	X [m]	Y [m]	$\sigma_{v0}$	$Z_w$ [m]
1	Sondage 1	0,00	-20,00	0,00	5,00
2	Sondage 2	0,00	20,00	0,00	5,00
3	Sondage 3	40,00	20,00	0,00	5,00
4	Sondage 4	40,00	-20,00	0,00	5,00
5	Sondage 5	20,00	0,00	0,00	0,00

Coordonnées des sondages, variation de la nappe et de la contrainte initiale

Définition des cotes de couches par sondage

Type d'interpolation: Interpolation par fonction radiale de type linéaire

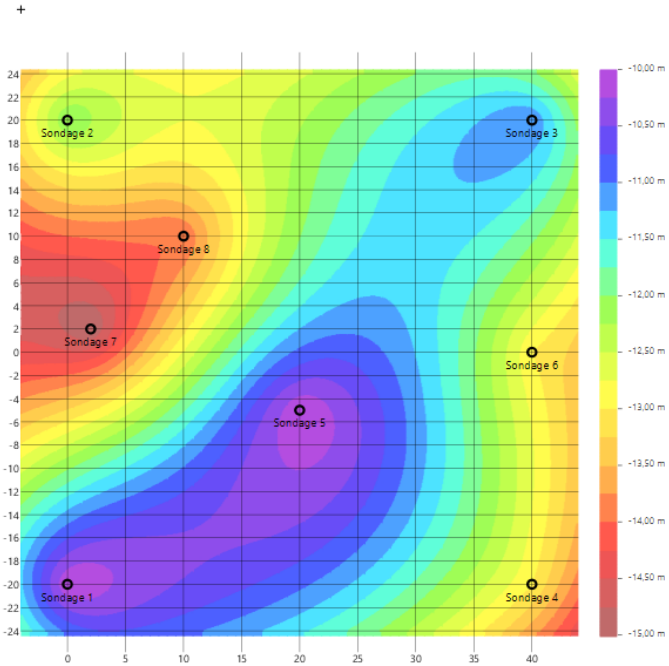
	Nom	Couleur	n	$Z_{1,Sondage 1}$	$Z_{2,Sondage 2}$	$Z_{3,Sondage 3}$
Toit du terrain naturel			0	10,00	10,00	10,00
Base de la couche 1	Couche 1		50	-5,00	-5,00	-5,00
Base de la couche 2	Couche 2		20	-10,00	-12,00	-11,00
Base de la couche 3	Couche 3		10	-20,00	-21,00	-22,00

Variation du TN et de la base des couches

Configurer le D.I. Lancer le calcul Voir les résultats

# Onglet « Couches »

Vue en dessus  
Cartographie de la base d'une couche

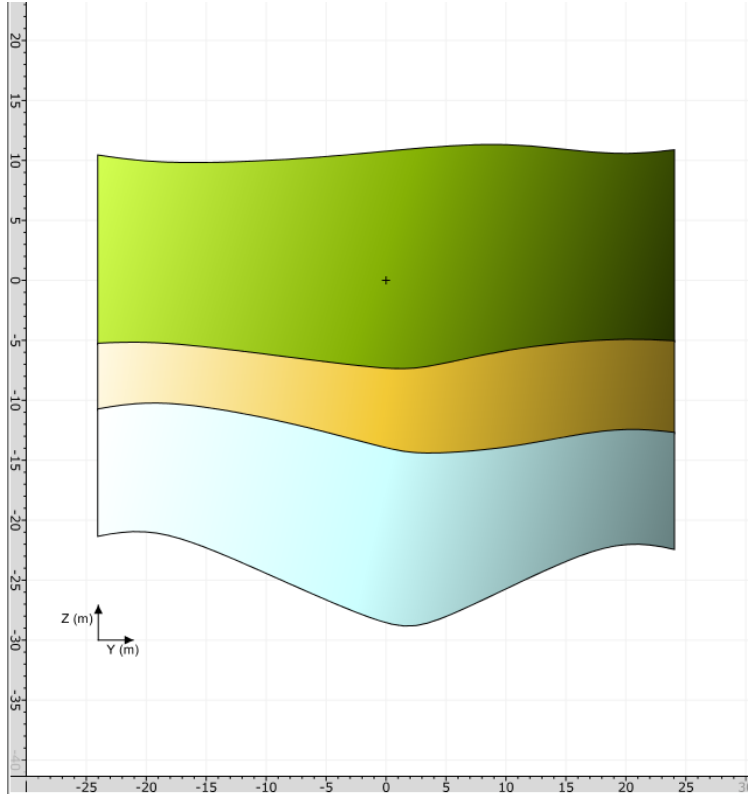


Configuration de la vue

Représentation graphique pour **Couche [2]**  Affichage en isovalues

Éléments	Options						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Symb.</th> <th>Désignation</th> <th>Visible</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Représentation ... 2</td> <td></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>	Symb.	Désignation	Visible	Représentation ... 2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Vue de dessus <input type="checkbox"/> Vue de côté, plan Oyz <input type="checkbox"/> Vue de côté, plan Oxz
Symb.	Désignation	Visible					
Représentation ... 2		<input checked="" type="checkbox"/>					

Vue de côté, plan Oyz  
Coupe stratigraphique



Configuration de la vue

Coordonnée X de la coupe [-4,00 ; 44,00] :

Éléments	Options						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Symb.</th> <th>Désignation</th> <th>Visible</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Représentation pour Oyz</td> <td></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>	Symb.	Désignation	Visible	Représentation pour Oyz		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Vue de dessus <input checked="" type="checkbox"/> Vue de côté, plan Oyz <input type="checkbox"/> Vue de côté, plan Oxz
Symb.	Désignation	Visible					
Représentation pour Oyz		<input checked="" type="checkbox"/>					

## Onglet « Comportement »

Paramètres Couches Comportement Charges Consolidation Calcul

### Comportement des couches

Définition des couches de sol

Type de tassement Tassement 1D

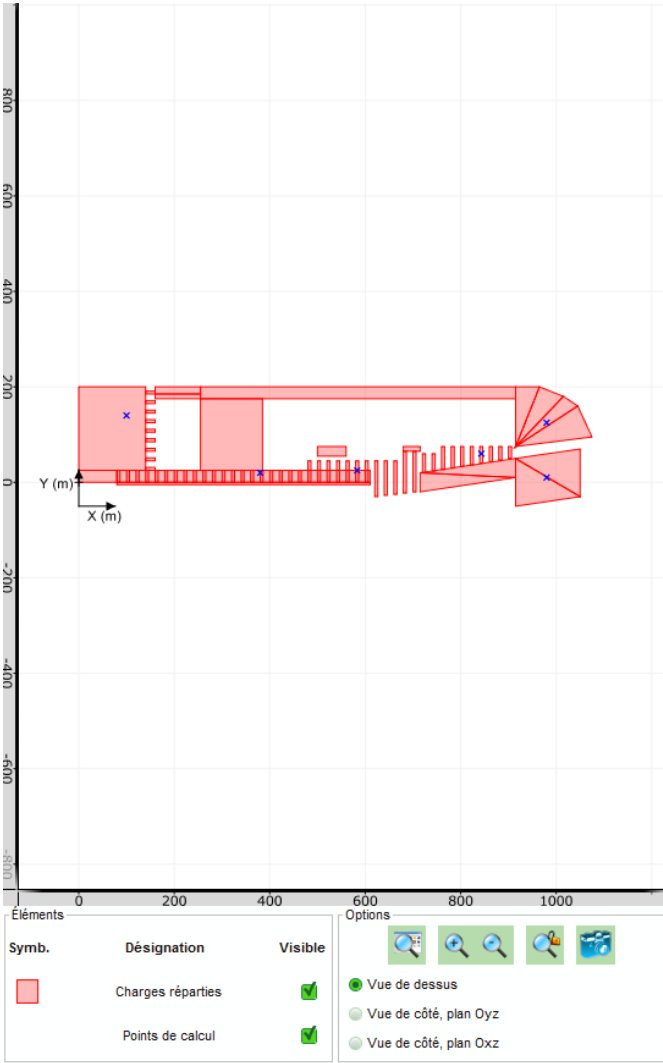
N°	Nom	Loi de comportement	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_{sol}$ [kPa]	$\nu$	$E_M$ [kPa]	Type de sol	$k_0$	$\epsilon_0$	$C_s/(1+e_0)$	$t_c$	$C_c/(1+e_0)$	$C_\alpha/(1+e_0)$	$t_0$ (jour)
1	Couche 1	Élastique linéaire	20,0	1,00E03	0,3	-		-	-	-	-	-	-	-
2	Couche 2	Oedométrique	20,0	-	0,3	-		-	-	0,150	1,000	0,0150	0,00E00	0,0
3	Couche 3	Élastique non linéaire	20,0	-	0,3	2,00E04	Sables, sabl...	4,55	8,00E-03	-	-	-	-	-

Comportement

- Élastique linéaire :  $E$ ,  $\nu$
- Élastique non linéaire :  $E_M$ ,  $\nu$ , Type de sol ou  $k_0$  et  $\epsilon_0$
- Œdométrique :  $C_s/(1+e_0)$ ,  $t_c$ ,  $C_c/(1+e_0)$ ,  $C_\alpha/(1+e_0)$ ,  $t_0$

Configurer le D.I. Lancer le calcul Voir les résultats

# Onglet « Charges »



Charges réparties

Créer nouveau... Dupliquer Importer... Supprimer Tout supprimer...

Chargement extérieur	Q [kPa]	Z [m]	X <sub>1</sub> [m]	Y <sub>1</sub> [m]	X <sub>2</sub> [m]
N°1 - Triangle	22,20	10,00	915,00	200,00	965,00
N°2 - Triangle	22,20	10,00	965,00	200,00	1015,00
N°3 - Triangle	22,20	10,00	1015,00	180,00	1045,00
N°4 - Triangle	22,20	10,00	1045,00	160,00	1075,00
N°5 - Triangle	18,90	10,00	915,00	50,00	1050,00
N°6 - Triangle	18,90	10,00	915,00	50,00	1050,00
N°7 - Triangle	18,90	10,00	715,00	20,00	915,00
N°8 - Triangle	18,90	10,00	715,00	20,00	915,00

Chargement extérieur	Q [kPa]	Z [m]	X [m]	Y [m]	B [m]
N°1 - Rectangle	42,00	10,00	0,00	0,00	80,00
N°2 - Rectangle	42,00	10,00	0,00	25,00	140,00
N°3 - Rectangle	28,60	10,00	140,00	25,00	20,00
N°4 - Rectangle	28,60	10,00	140,00	45,00	20,00
N°5 - Rectangle	28,60	10,00	140,00	65,00	20,00
N°6 - Rectangle	28,60	10,00	140,00	85,00	20,00
N°7 - Rectangle	28,60	10,00	140,00	105,00	20,00
N°8 - Rectangle	28,60	10,00	140,00	125,00	20,00
N°9 - Rectangle	28,60	10,00	140,00	145,00	20,00
N°10 - Rectangle	28,60	10,00	140,00	165,00	20,00
N°11 - Rectangle	28,60	10,00	140,00	185,00	20,00
N°12 - Rectangle	22,20	10,00	160,00	185,00	95,00
N°13 - Rectangle	22,20	10,00	160,00	175,00	95,00
N°14 - Rectangle	0,01	10,00	80,00	-5,00	530,00

Configurer le D.I. Lancer le calcul Voir les résultats

Assistant de charges pour Tasseldo

Chargement circulaire uniforme Chargement annulaire uniforme Chargement type talus 3D **Polygone**

Précisions  
Cet onglet va vous permettre de créer l'équivalent d'une charge :

- dont la forme est un polygone convexe (point définis dans le sens horaire)
- dont la densité est uniforme

Géométrie  
Rectangle

X [m]	Y [m]
0	0
0	10
10	15
20	10
20	0
10	-5

Aperçu

Maillage  
Subdivisions: 30  
Densité (kPa): 100,00  
Z (m): 0,00

Transférer Annuler Copier paramètres Coller paramètres

# Onglet « Consolidation »

Paramètres de consolidation

Options générales

Prise en compte de la consolidation

Temps de reconsolidation instantané  Consolidation en contraintes  Mise en place d'un système de drain

Conditions de drainage : Double drainage

Paramètres de consolidation

Pas de temps [jour] : 5,0

Temps T<sub>1</sub> [jour] : 100,0    Temps T<sub>2</sub> [jour] : 1000,0    Temps T<sub>3</sub> [jour] : 5000,0

Temps T<sub>4</sub> [jour] : 10000,0    Temps final [jour] : 30000,0

N°	Nom	Prise en compte de la consolidation	C <sub>v</sub> [m <sup>2</sup> /s]
1	Couche 1	<input type="checkbox"/>	1,00E00
2	Couche 2	<input type="checkbox"/>	1,00E00
3	Couche 3	<input checked="" type="checkbox"/>	1,20E-06
4	Couche 4	<input type="checkbox"/>	1,00E00
5	Couche 5	<input checked="" type="checkbox"/>	2,00E-08
6	Couche 6	<input checked="" type="checkbox"/>	6,00E-08
7	Couche 7	<input checked="" type="checkbox"/>	1,00E-06
8	Couche 7	<input checked="" type="checkbox"/>	9,00E-08
9	Couche 8	<input type="checkbox"/>	1,00E00
10	Couche 9	<input type="checkbox"/>	1,00E00
11	Couche 10	<input type="checkbox"/>	1,00E00

Système de drainage

Diamètre de maillage [m] : 3,00

Diamètre équivalent de drain [m] : 0,15

Configurer le D.L.       

Options générales

Prise en compte de la consolidation

Temps de reconsolidation instantané  Consolidation en contraintes  Mise en place d'un système de drain

Conditions de drainage : Double drainage

Paramètres de consolidation

Pas de temps [jour] : 1,0

Temps T<sub>1</sub> [jour] : 10,0    Temps T<sub>2</sub> [jour] : 50,0    Temps T<sub>3</sub> [jour] : 70,0

Temps T<sub>4</sub> [jour] : 100,0    Temps final [jour] : 200,0

N°	Nom	Prise en compte de la consolidation	C <sub>v</sub> [m <sup>2</sup> /s]	Type de sol	k = C <sub>f</sub> /C <sub>v</sub>
1	Limon	<input checked="" type="checkbox"/>	2,00E-07	Sol limono-argileux	
2	Argile	<input checked="" type="checkbox"/>	1,00E-07	Sol argileux	

Système de drainage

Diamètre de maillage [m] : 3,00

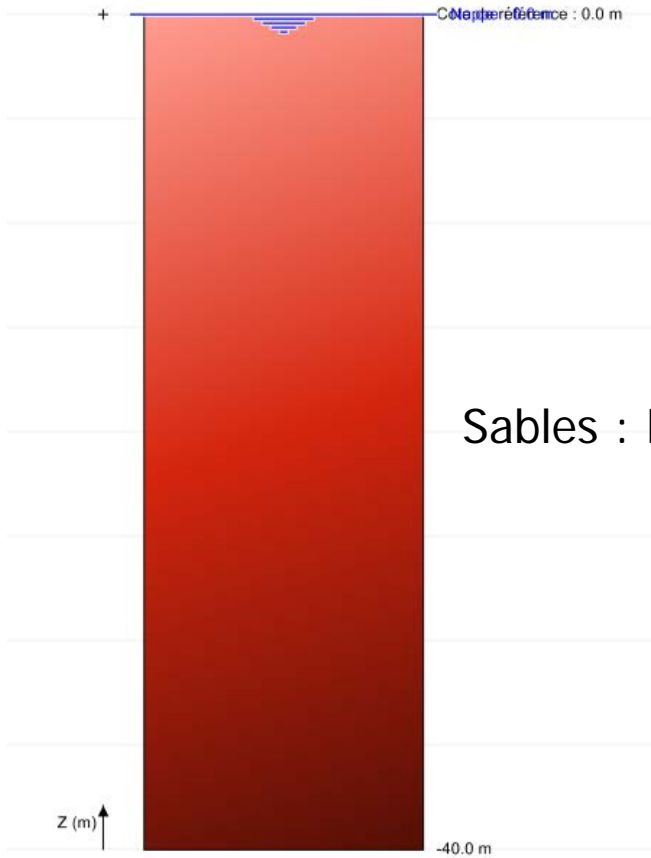
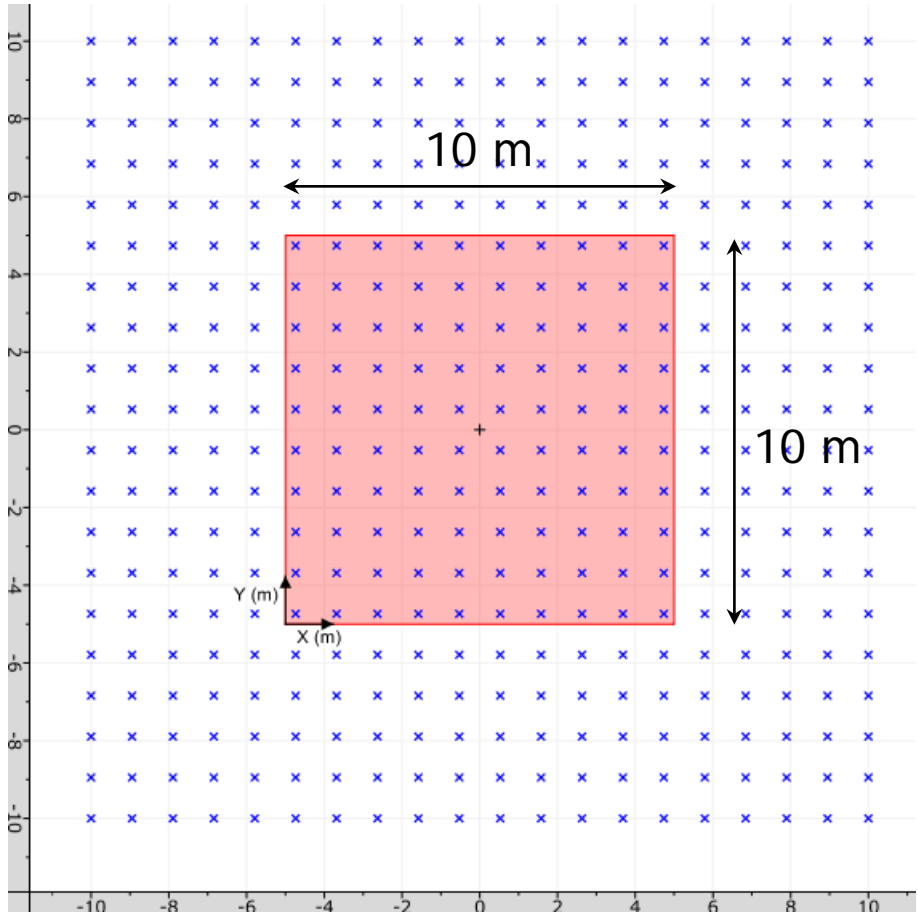
Diamètre équivalent de drain [m] : 0,10



Exercice 1 : Calcul en élastique non linéaire

M.T. Hoang & F. Cui  
Terrasol

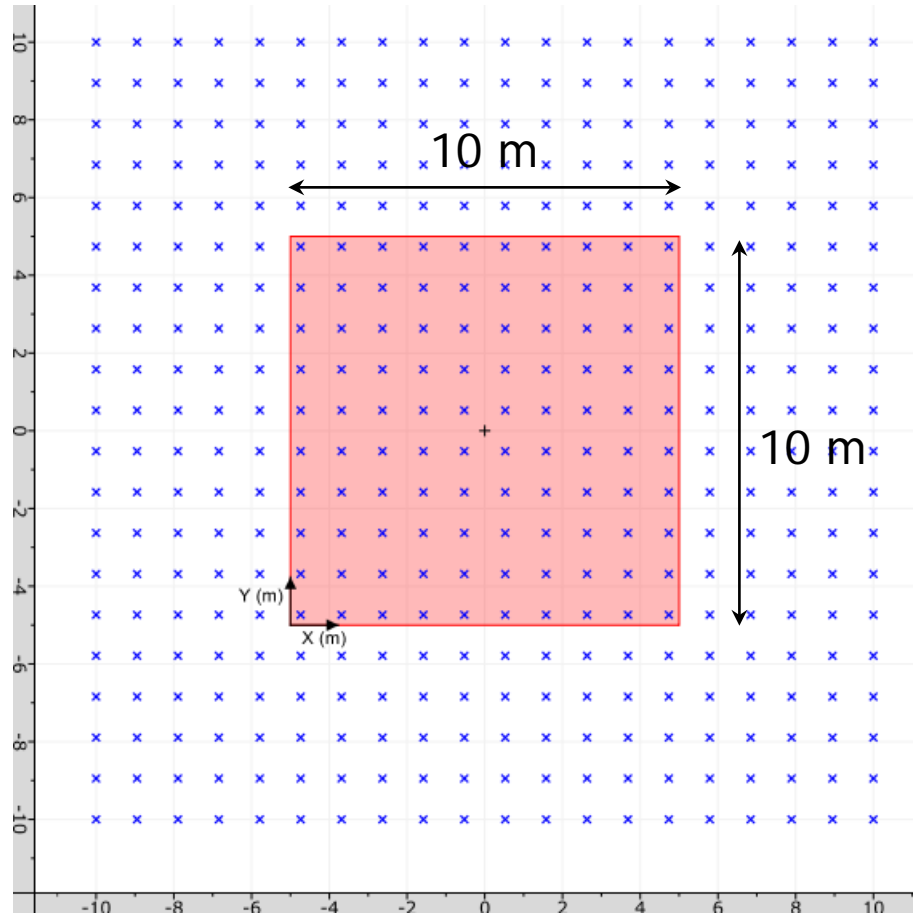
# Exercice 1 : calcul en élastique non linéaire



Sables :  $E_M = 10 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0.35$



# Exercice 1 : calcul en élastique non linéaire



Limon :  $E_M = 7 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0.35$

Sable :  $E_M = 15 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0.35$

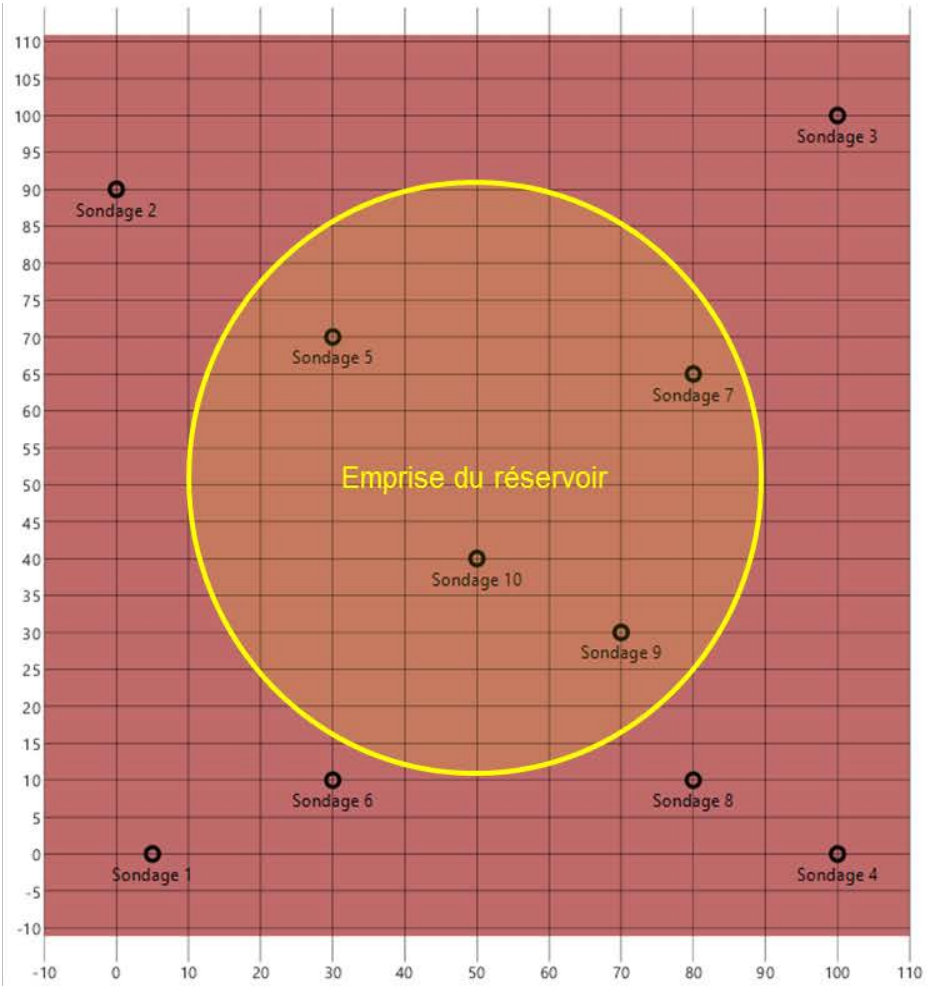
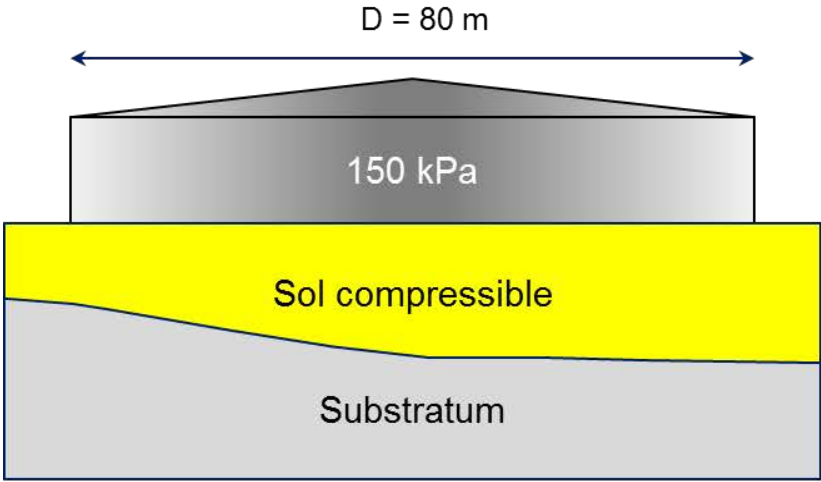
Argile :  $E_M = 10 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0.35$



Exercice 2 : Stratigraphie 3D définie par un réseau de sondages

M.T. Hoang & F. Cuira  
Terrasol

# Exercice 2 : Stratigraphie 3D définie par sondages



## Exercice 2 : Stratigraphie 3D définie par sondages

N°	Nom	X (m)	Y (m)	$\sigma_{v0}$ (kPa)	$Z_w$ (m)		n	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	z10
1	Sondage 1	5	0	0.0	-1.0	Toit du TN	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Sondage 2	0	90	0.0	-1.0	Base de la couche 1	10	-3.0	-2.5	-3.0	-7.0	-4.0	-6.0	-6.0	-6.3	-6.0	-6.0
3	Sondage 3	100	100	0.0	-1.0	Base de la couche 2	10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
4	Sondage 4	100	0	0.0	-1.0												
5	Sondage 5	30	70	0.0	-1.0												
6	Sondage 6	30	10	0.0	-1.0												
7	Sondage 7	80	65	0.0	-1.0												
8	Sondage 8	80	10	0.0	-1.0												
9	Sondage 9	70	30	0.0	-1.0												
10	Sondage 10	50	40	0.0	-1.0												

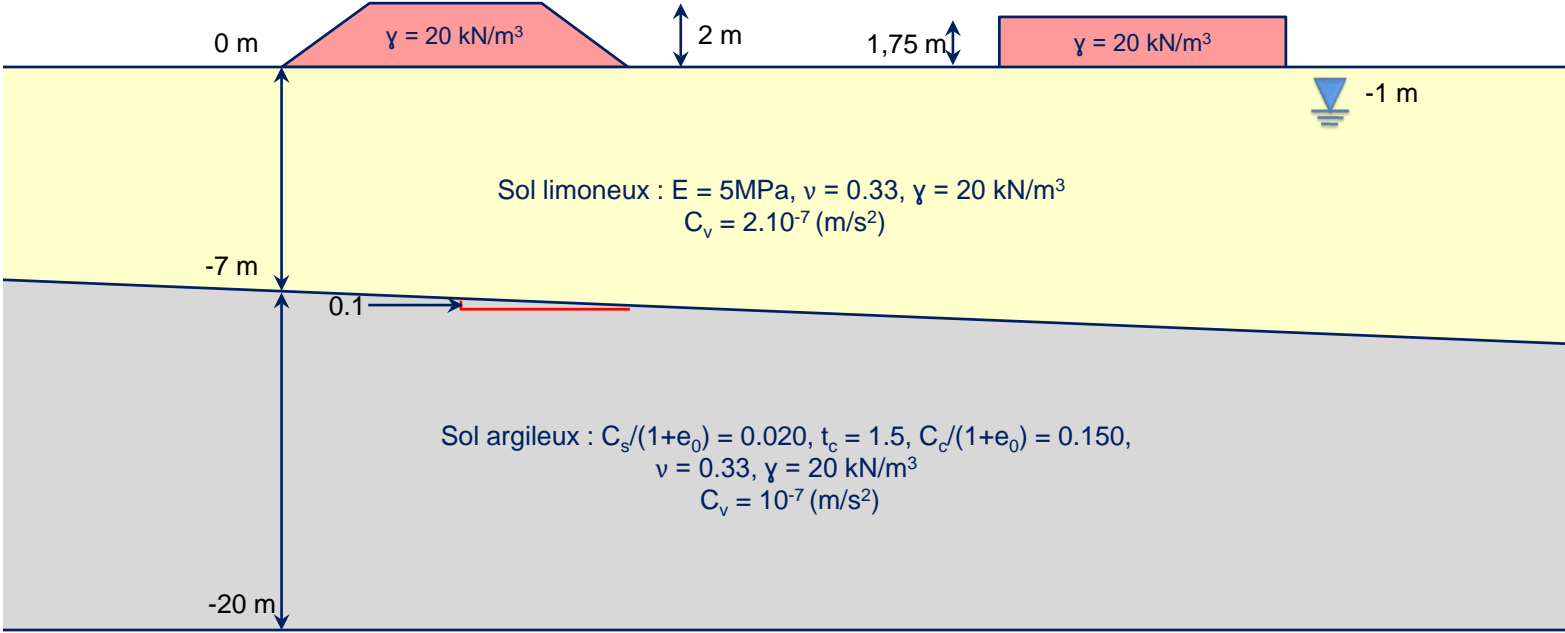
N°	Nom	Comportement	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kPa)	$\nu$	$C_s / (1+e_0)$	$t_c$	$C_c / (1+e_0)$	$C_\alpha / (1+e_0)$	$t_c$ (jours)
1	Couche 1	OEdométrique	18	-	0,33	0,010	1,1	0,090	0,005	50
2	Couche 2	Élastique non linéaire	20	50 000	0,33	-	-	-	-	-



Exercice 3 : Calcul de consolidation

M.T. Hoang & F. Caira  
Terrasol

# Exercice 3 : Calcul de consolidation



# Exercice 3 : Calcul de consolidation

