

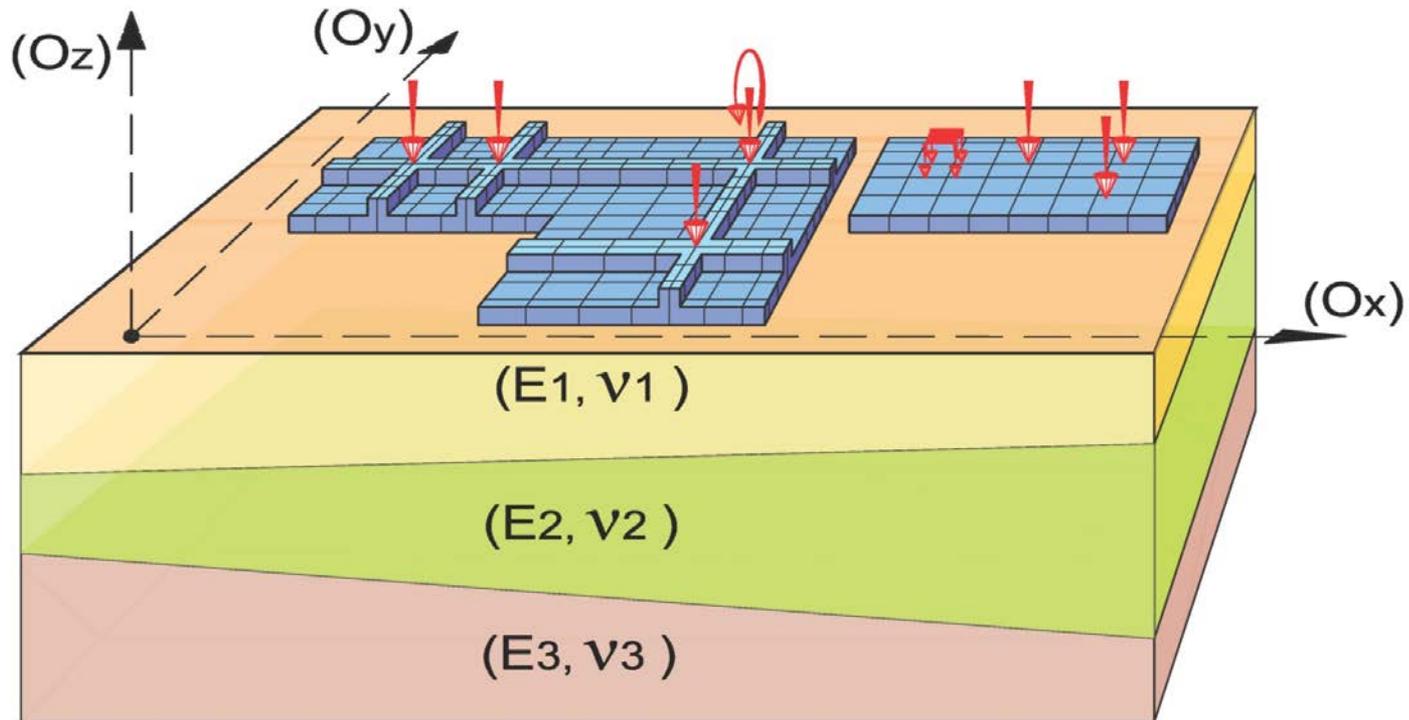
TASPLAQ : modélisation 3D simplifiée d'un  
radier sur terrain multicouche élastique

# Sommaire

- ⇒ Bases théoriques
- ⇒ Mise en œuvre pratique dans Foxta v4
- ⇒ Exemples d'ouvrage
- ⇒ Exercices d'application

# Bases théoriques

⇒ Position du problème

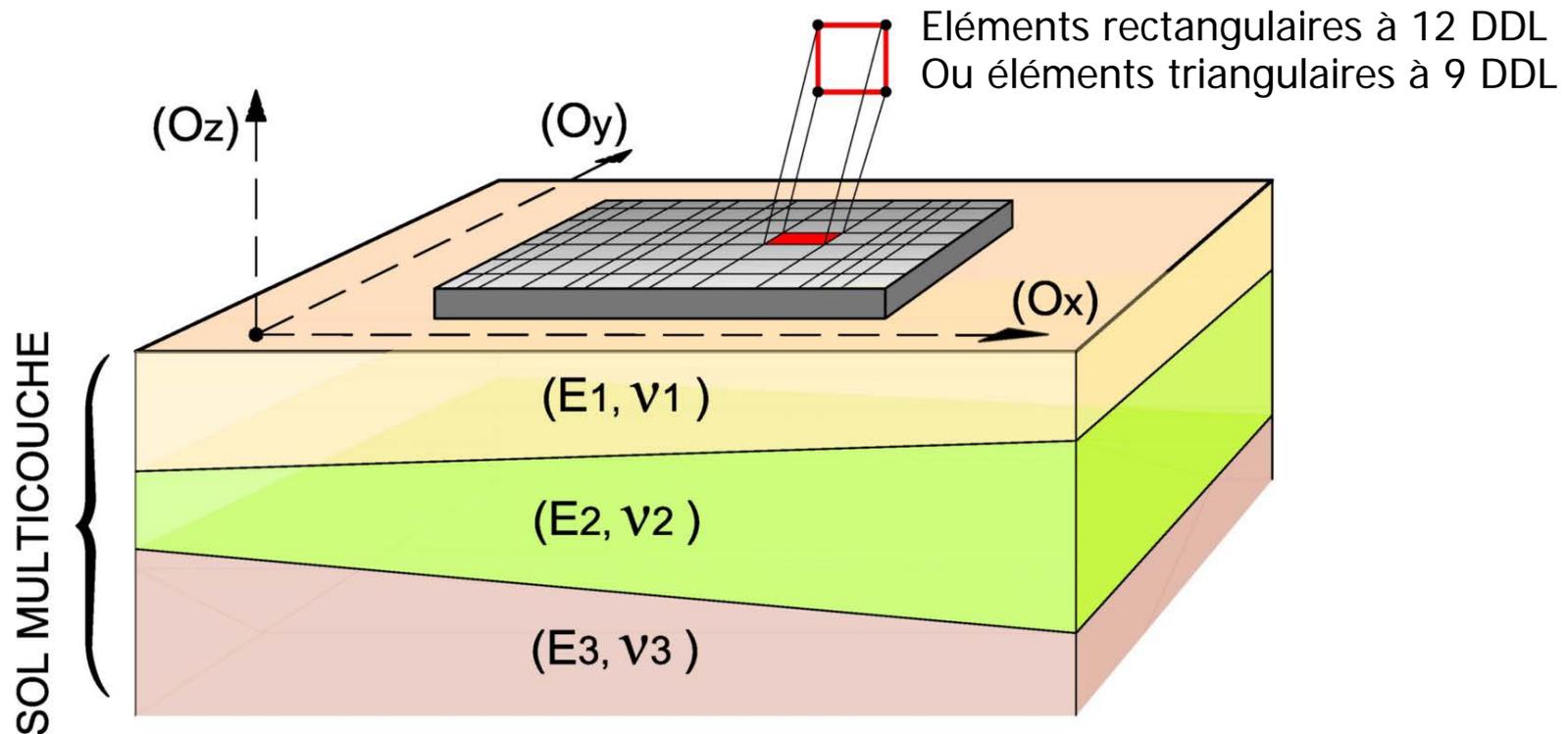


Radier de géométrie et d'inertie quelconque reposant sur un terrain multicouche élastique

# Bases théoriques

⇒ Modèle « hybride » : couplage entre deux approches

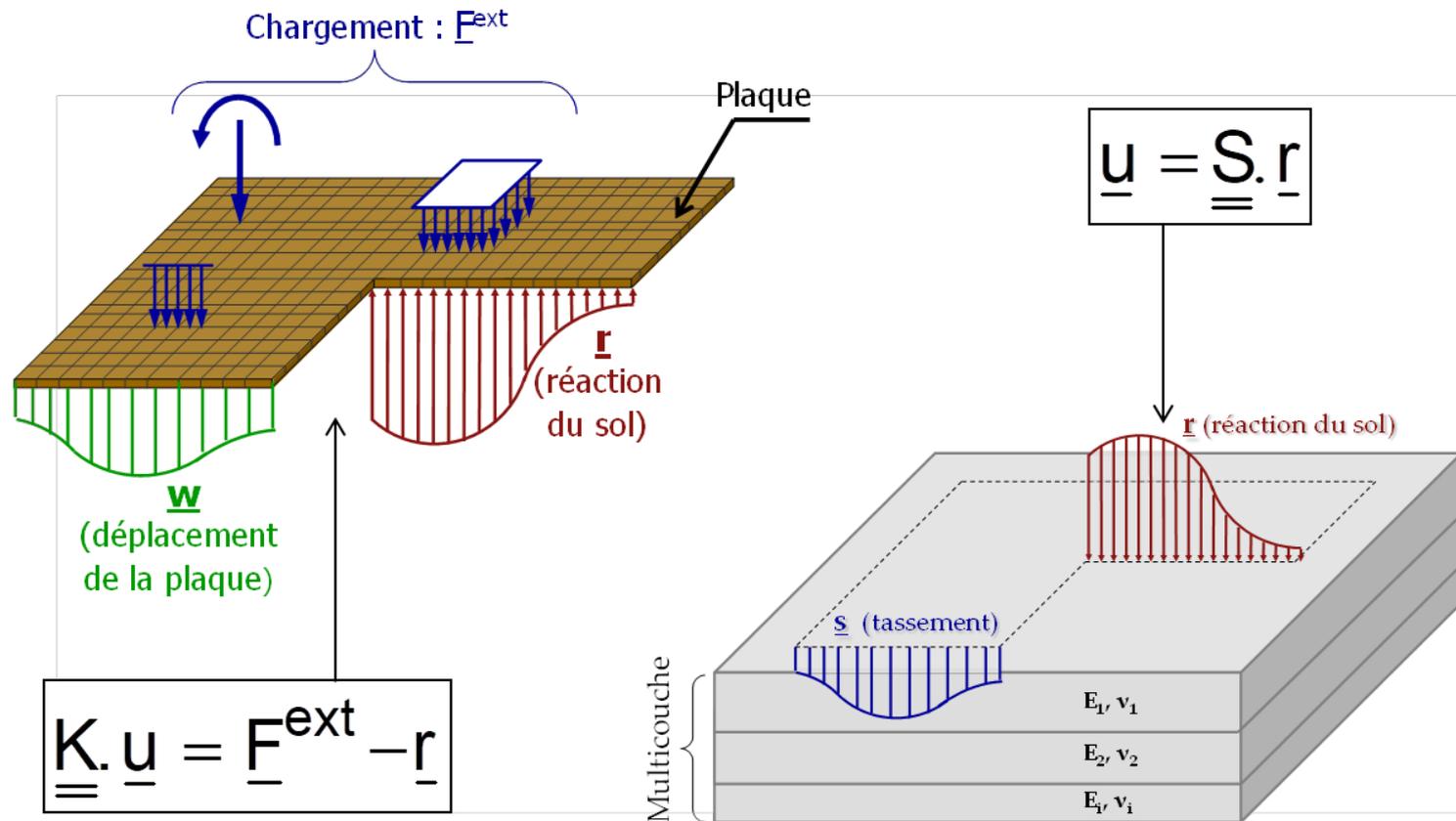
- Radier ou dallage : solution numérique par éléments finis de plaque
- Sol support : solution analytique pré-établie (théorie de l'élasticité)



# Bases théoriques

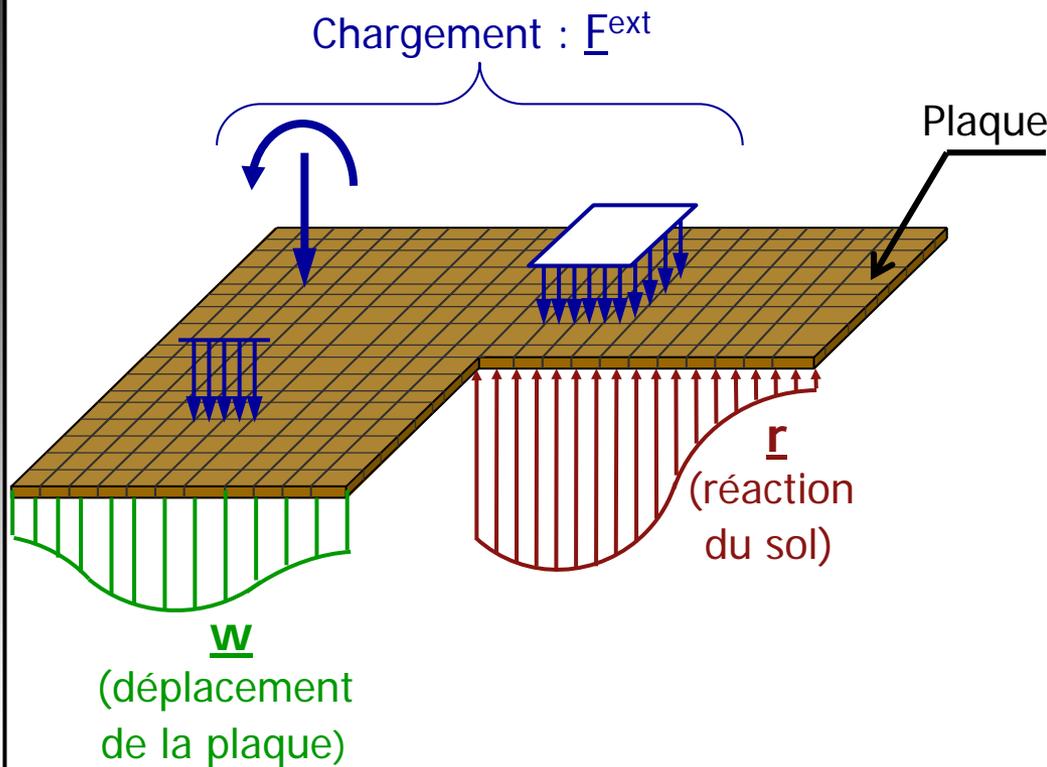
⇒ Modèle « hybride » : couplage entre deux approches

- Radier ou dallage : solution numérique par éléments finis de plaque
- Sol support : solution analytique pré-établie (théorie de l'élasticité)



# Bases théoriques

## ■ Discrétisation du radier en éléments finis de plaque



- Assimilé à une plaque d'inertie et géométrie variables
- Discrétisation en éléments finis rectangulaires ou triangulaires (Kirchhoff, 12 ou 9 DDL)
- Equilibre statique d'une plaque élastique :

$$\underline{\underline{K}}^e \cdot \underline{w} = \underline{F}^{ext} - \underline{r}$$

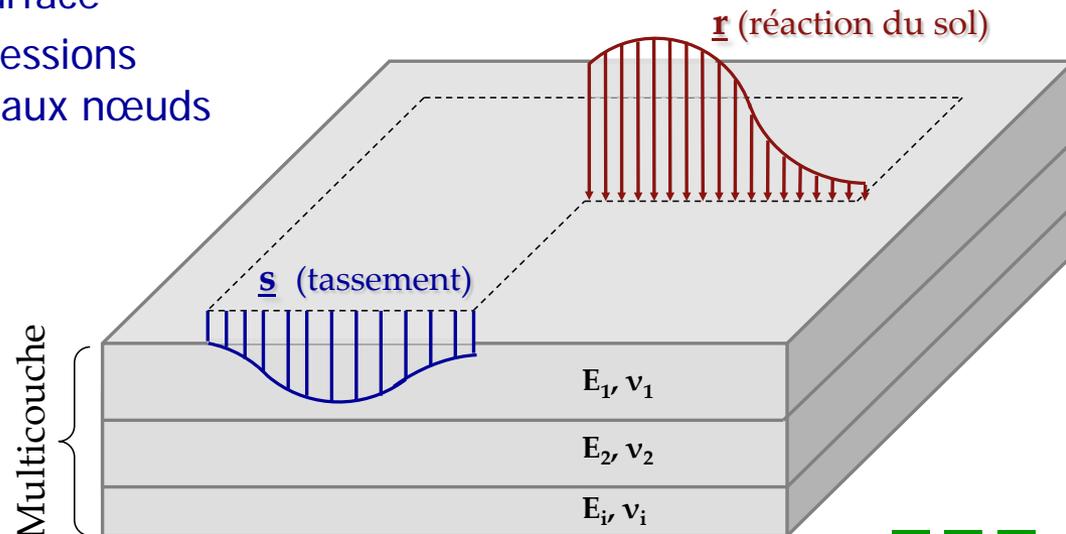
Matrice de rigidité de la plaque

# Bases théoriques

- Utilisation de solutions pré-établies en élasticité pour la réponse du sol
  - ⇒ Hypothèse que les contraintes se propagent de la même manière dans un multicouche que dans un massif homogène
  - ⇒ Exige un faible contraste de rigidités entre les différentes couches
  - ⇒ Validité confortée par des retours d'expérience (Burland, 1977)
  - ⇒ Approche conservative pour des stratigraphies très contrastées
  
- Modèle de Steinbrenner + Méthode de superposition
  - ⇒ Tassements en tout point de surface
  - ⇒ Relation matricielle entre les pressions d'interaction et les tassements aux nœuds

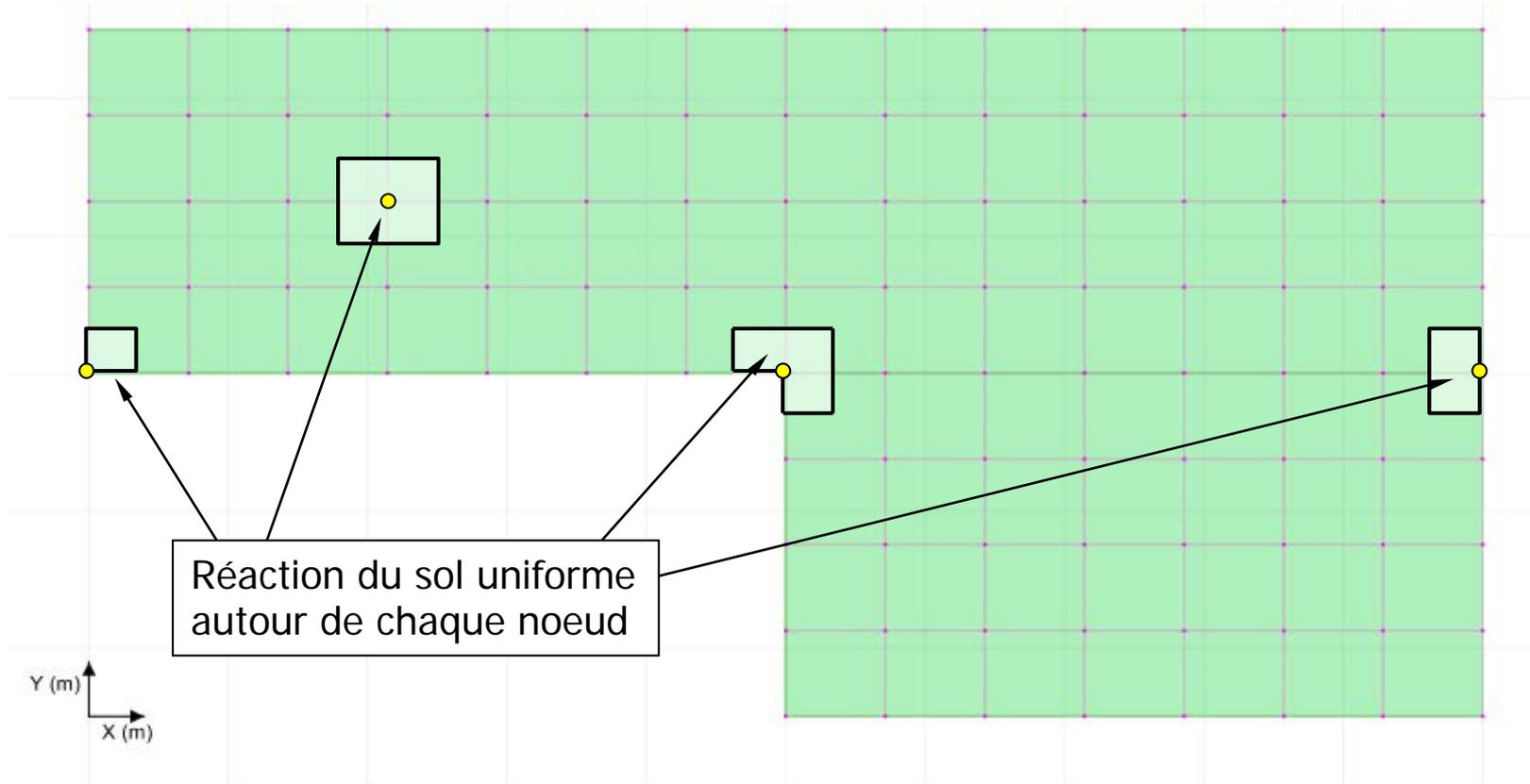
$$\underline{\underline{s}} = \underline{\underline{T}}^s \cdot \underline{\underline{r}}$$

Matrice de  
souplesse  
du sol



# Bases théoriques

- Discrétisation du champ de pressions d'interaction sol/radier

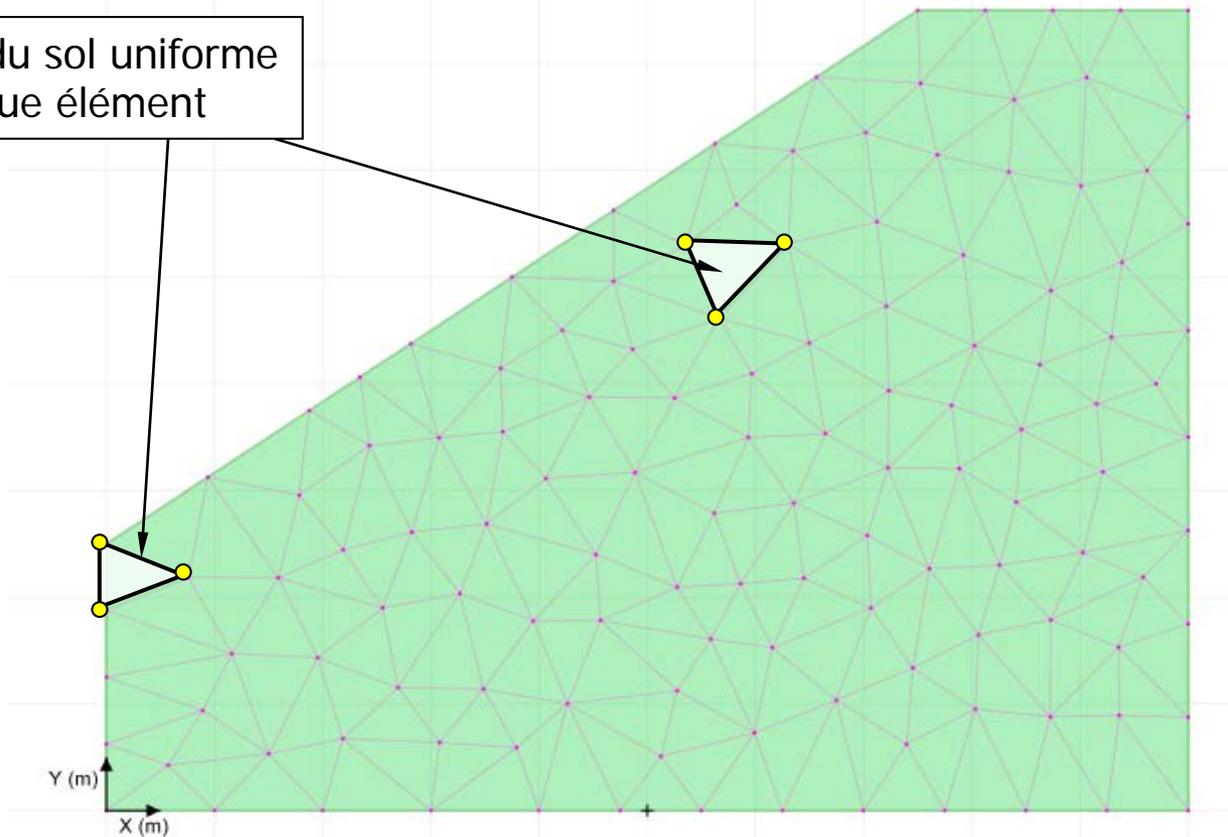


Maillage rectangulaire = pressions associées aux nœuds

# Bases théoriques

- Discrétisation du champ de pressions d'interaction sol/radier

Réaction du sol uniforme  
sous chaque élément



Maillage triangulaire = pressions associées aux éléments

# Bases théoriques

## ■ Constitution du système d'équations

- Equation d'équilibre de la plaque (w, r)
- Matrice d'influence du sol (modèle de Boussinesq) (s, r)
- Condition de contact (w, s, r)
  - ( $w = s$ ) si pas de traction ( $r > 0$ )
  - Si traction ( $r < 0$ ) => décollement : ( $w \neq s$ ) et ( $r = 0$ )

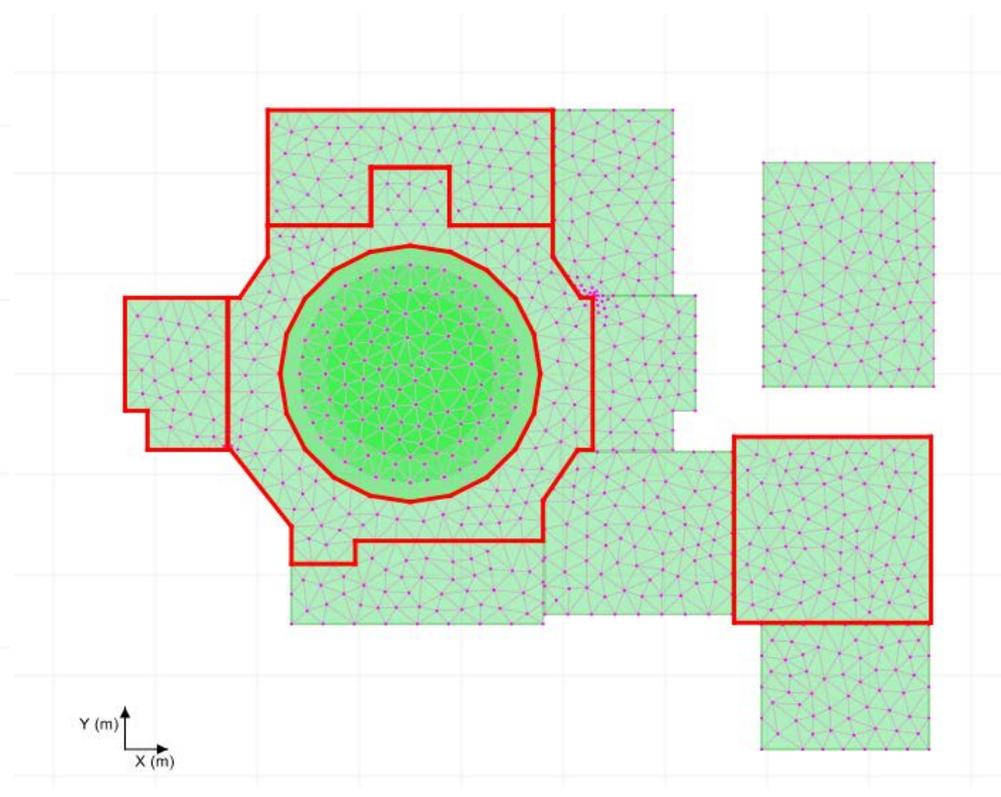
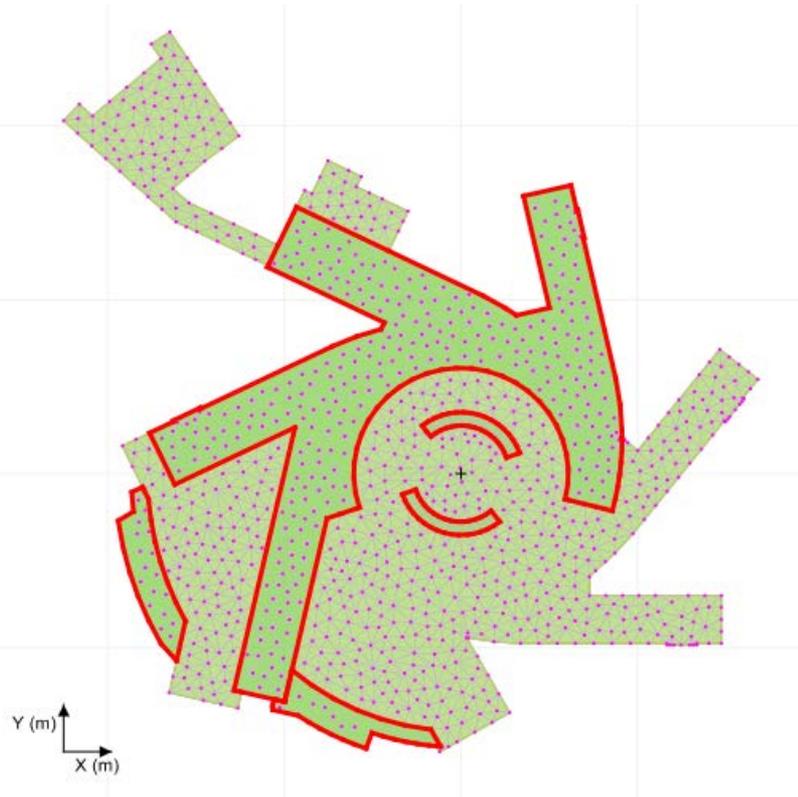
Trois équations, trois inconnues (r, s et w) => problème mathématiquement résolu

## ■ Résolution =>

- Flèche de la plaque en tout point de chaque élément
- Tassements et réactions en tout point de la surface et en profondeur
- Sollicitations dans la plaque : moments et efforts tranchants

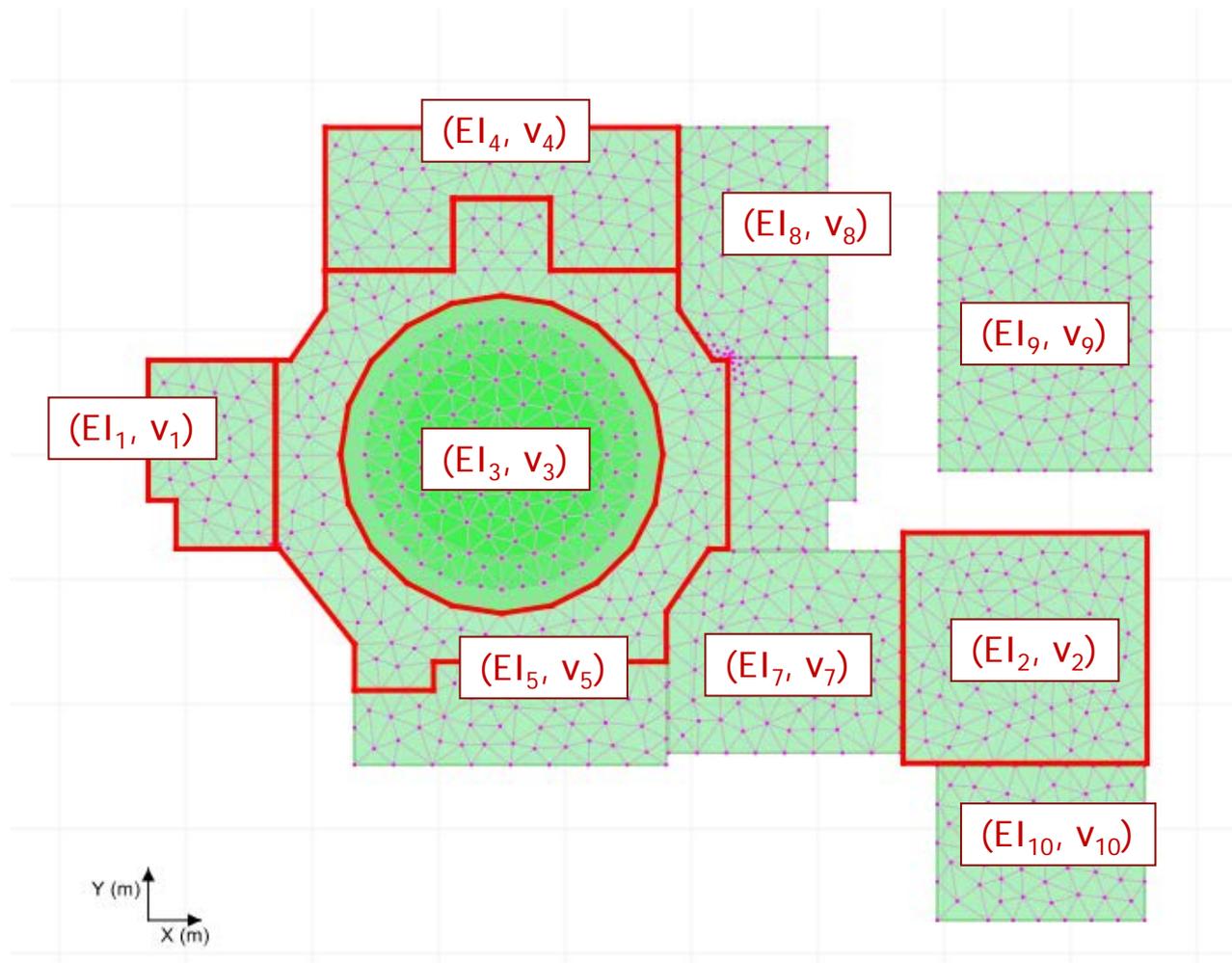
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Un ou plusieurs radiers de géométrie quelconque



# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Radier d'inertie variable



# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Chargement réparti, linéique ou ponctuel

The screenshot displays the Foxta v4 software interface. On the left, a 2D mesh model of a structure is shown with a coordinate system (X, Y) in meters. Three load types are highlighted with callouts: 'Ponctuel' (point load) represented by red dots, 'Linéique' (line load) represented by a blue line, and 'Réparti' (distributed load) represented by a red rectangular area. On the right, the 'Modélisation du projet' (Project Modeling) window is open, showing a table of modeled entities.

**Modélisation du projet**

Liste des entités modélisées

Plaque	n	S [m <sup>2</sup> ]	E [kPa]	v	e [m]	Z <sub>base</sub> [m]
N°1 - Polygone	5	225,00	1,00E07	0,15	0,80	0,00

Surcharge linéique	X <sub>1</sub> [m]	Y <sub>1</sub> [m]	X <sub>2</sub> [m]	Y <sub>2</sub> [m]	Q [kN/m]
N°1 - Ligne	-9,00	1,00	-9,00	5,00	100,00
N°2 - Ligne	9,00	1,00	9,00	14,00	100,00
N°3 - Ligne	-9,00	1,00	9,00	1,00	100,00
N°4 - Ligne	5,00	14,00	9,00	14,00	100,00

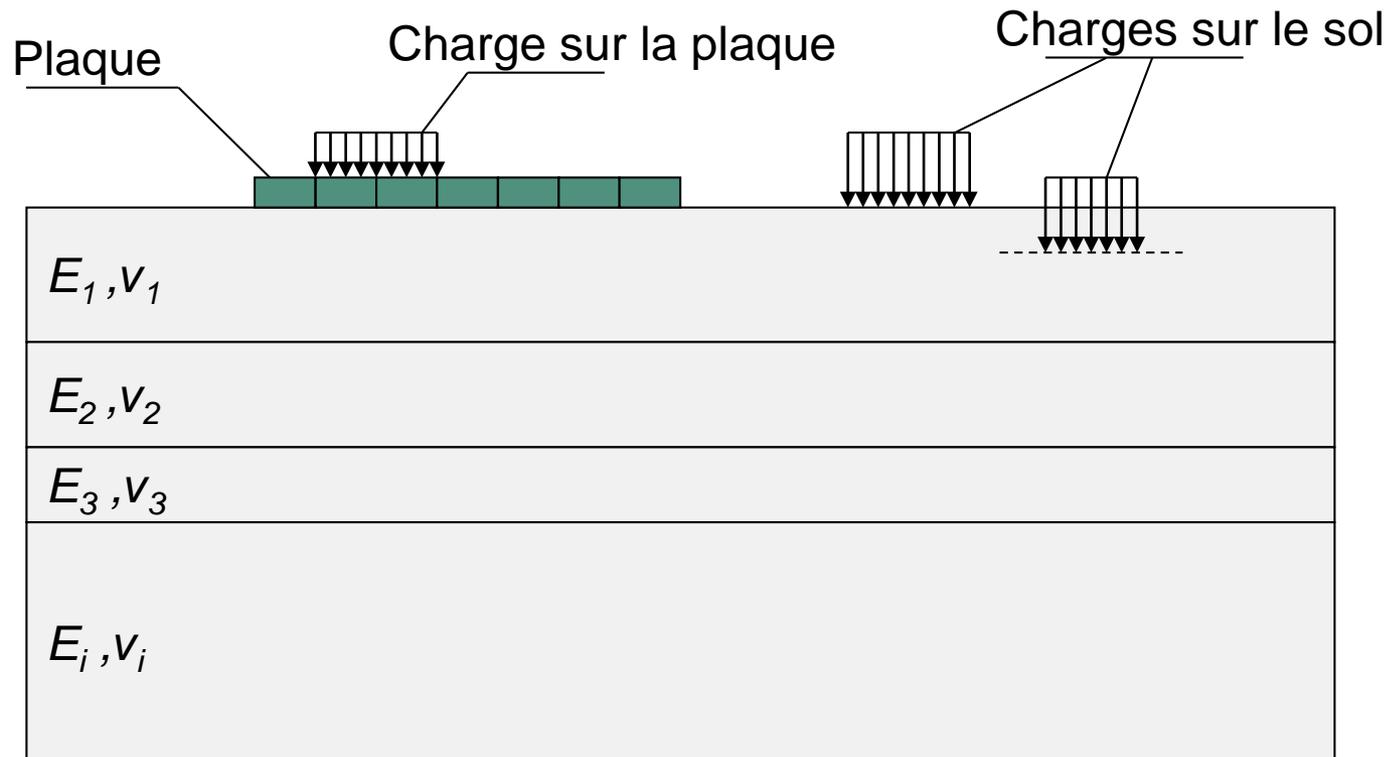
Points sur segment	X [m]	Y [m]	Groupe	Q <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kN.m]	M <sub>y</sub> [kN.m]
N°1 - Point	-8,00	5,00	1	200,00	0,00	0,00
N°2 - Point	-6,67	5,89	1	200,00	0,00	0,00
N°3 - Point	-5,33	6,78	1	200,00	0,00	0,00
N°4 - Point	-4,00	7,67	1	200,00	0,00	0,00
N°5 - Point	-2,67	8,56	1	200,00	0,00	0,00
N°6 - Point	-1,33	9,44	1	200,00	0,00	0,00
N°7 - Point	-0,00	10,33	1	200,00	0,00	0,00
N°8 - Point	1,33	11,22	1	200,00	0,00	0,00
N°9 - Point	2,67	12,11	1	200,00	0,00	0,00
N°10 - Point	4,00	13,00	1	200,00	0,00	0,00

Surcharge répartie	X [m]	Y [m]	B [m]	L [m]	θ [°]	Q [kPa]
N°1 - Rectangle	-2,00	2,00	10,00	4,00	20,0	100,00

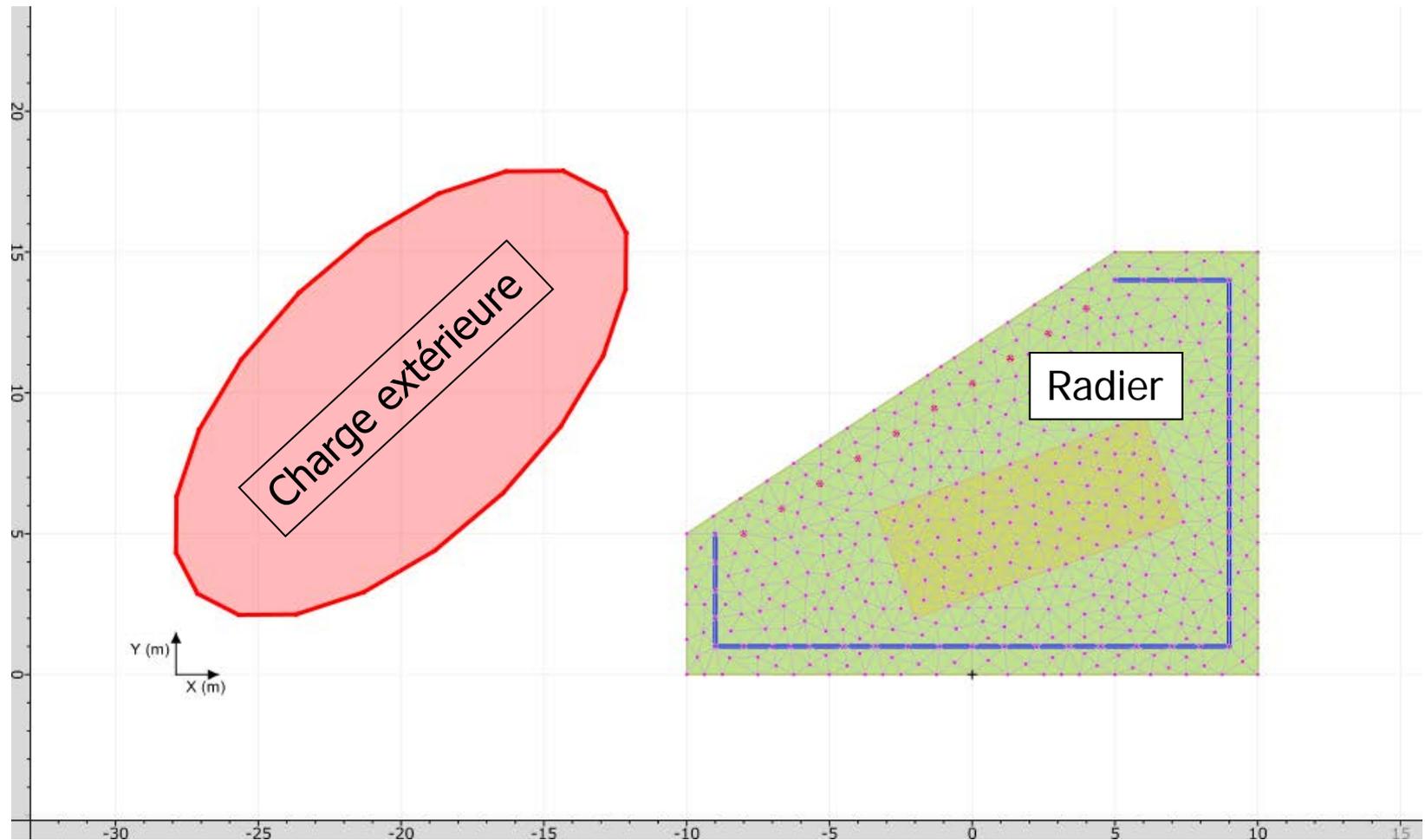
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Sol multicouche élastique + charges extérieures



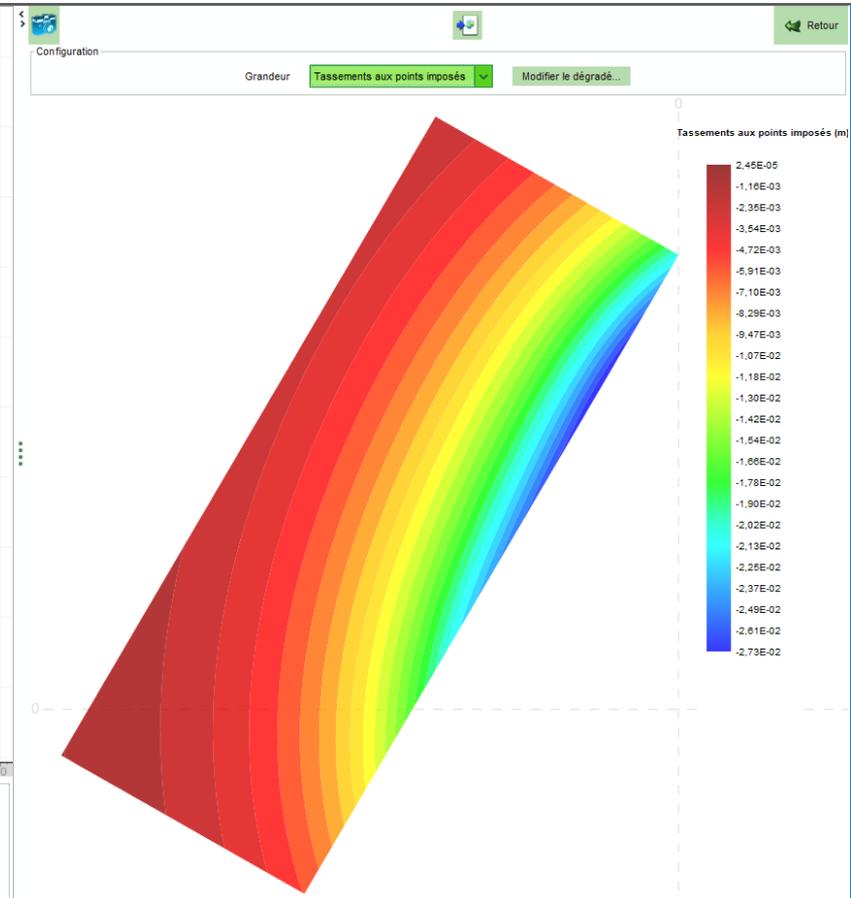
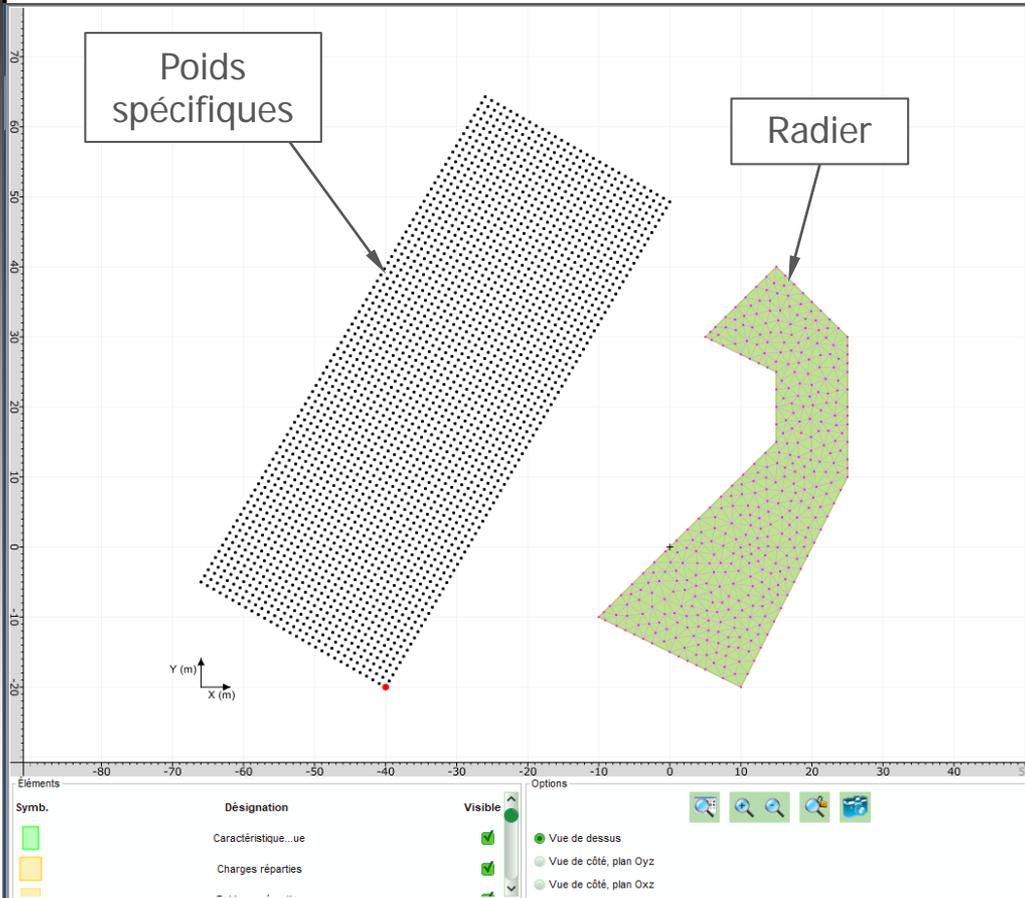
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Sol multicouche élastique + charges extérieures



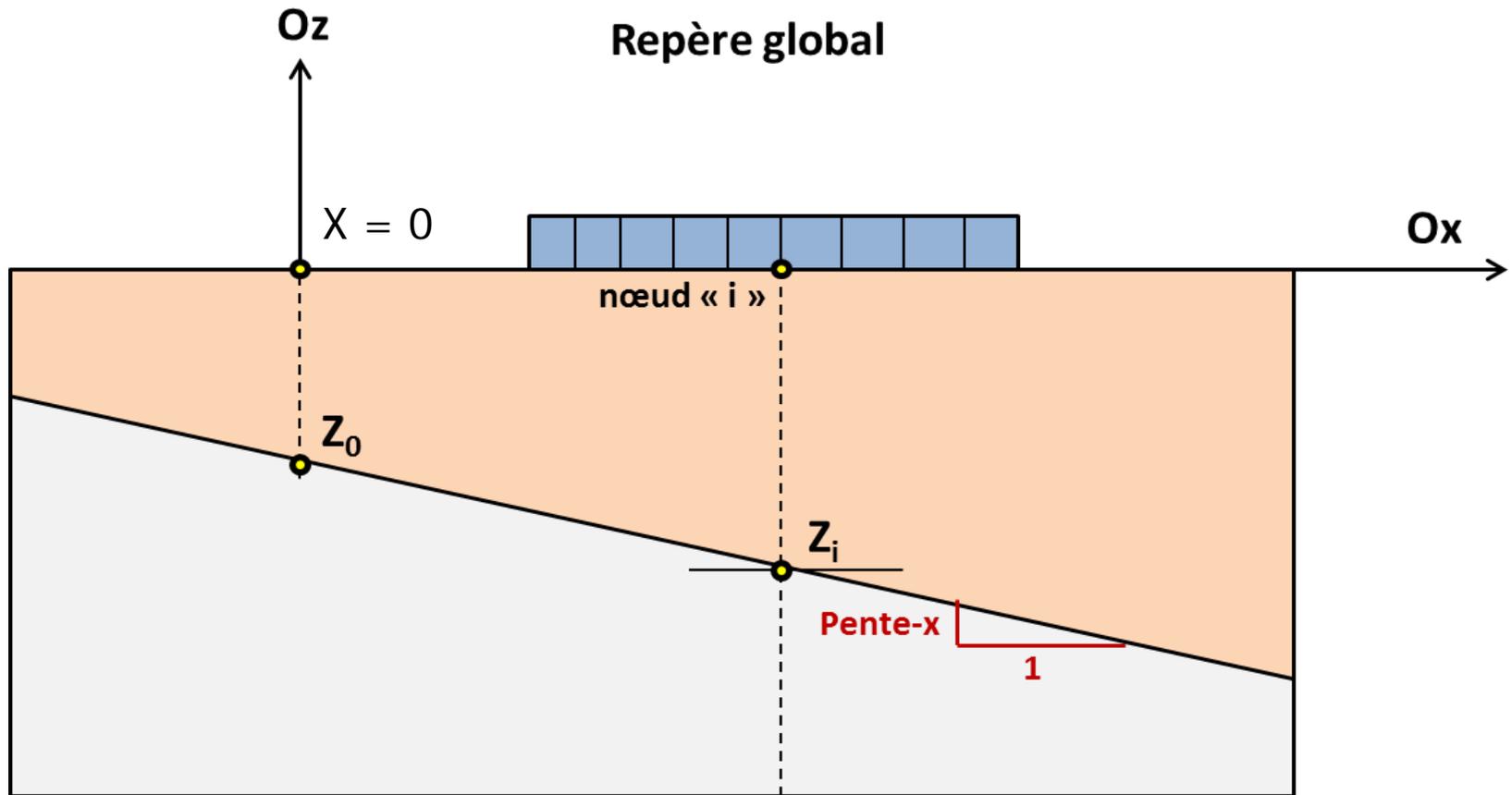
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Tassement en des points spécifiques



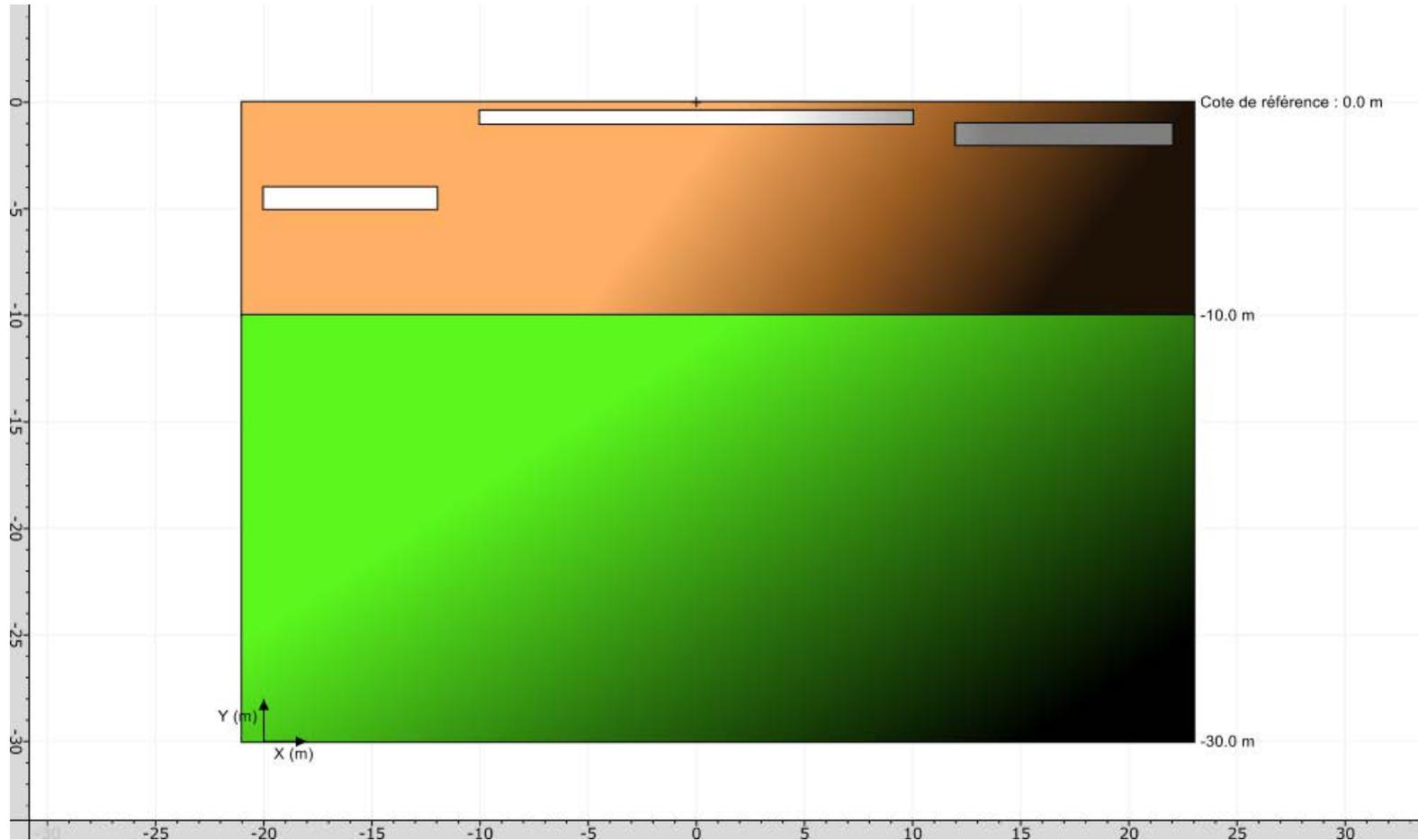
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Traitement d'un pendage par couche et par direction



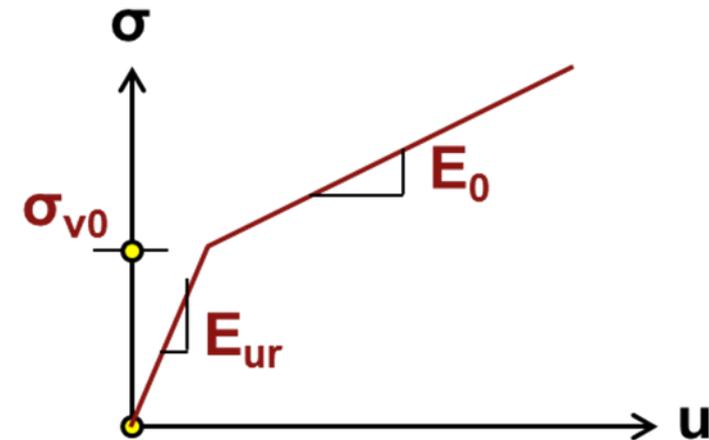
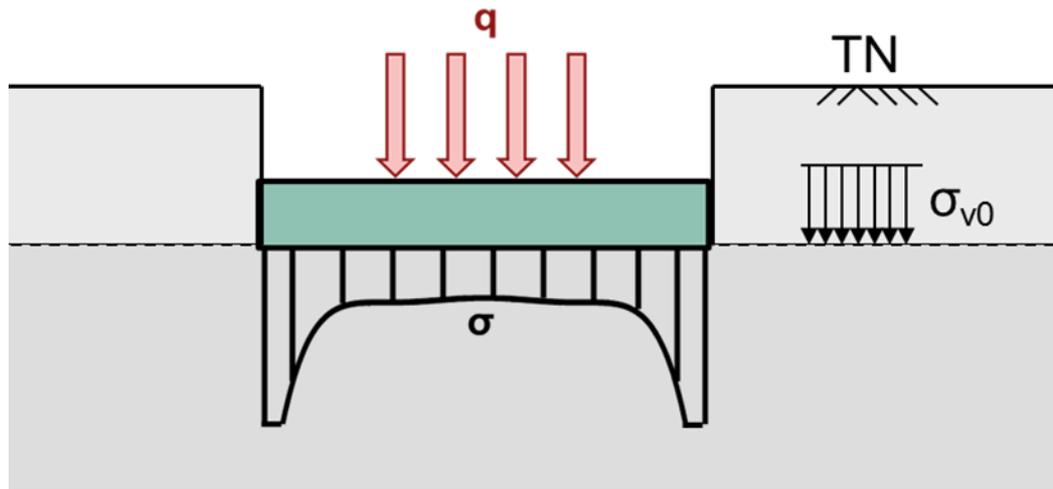
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Cote d'assise variable



# Mise en œuvre dans Foxta v4

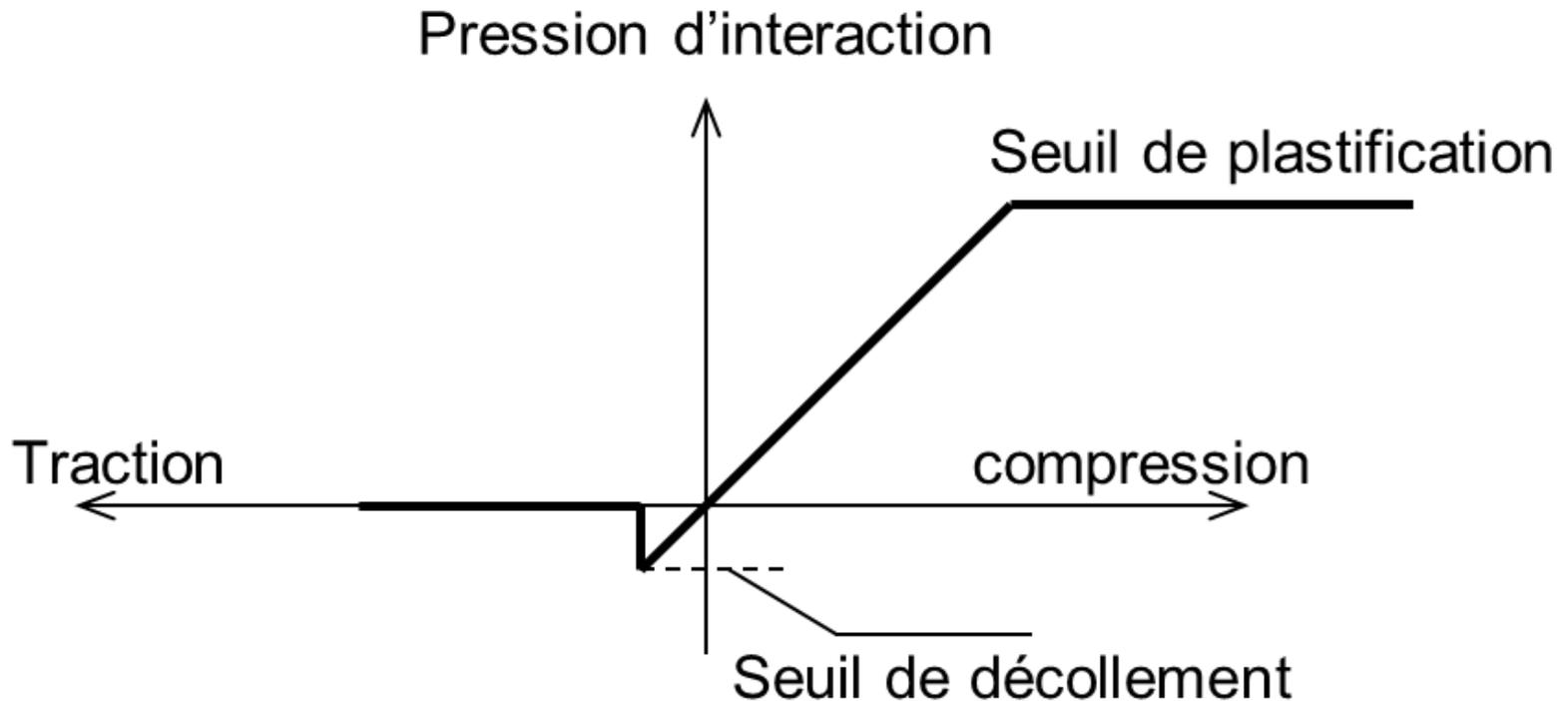
- Prise en compte de l'historique de terrassement



⇒ Avec la possibilité d'imposer un rapport « k » en le module de rechargement et celui de 1<sup>er</sup> chargement (= calcul itératif)

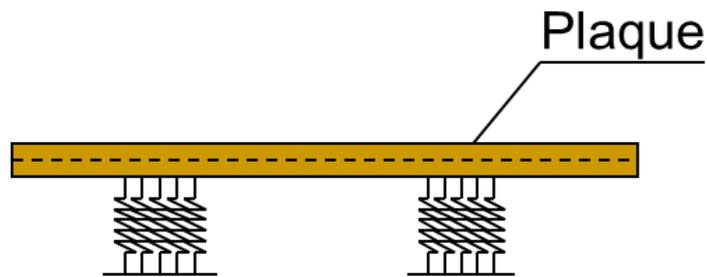
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Décollement/plastification à l'interface

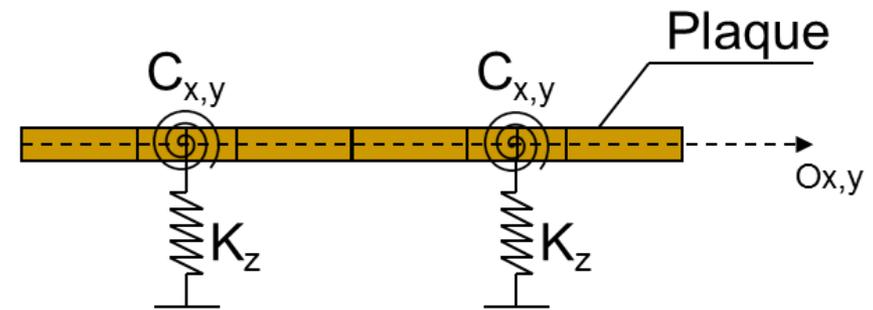


# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Possibilité d'introduire des appuis élastiques (à la place ou en plus du sol)



Ressorts surfaciques

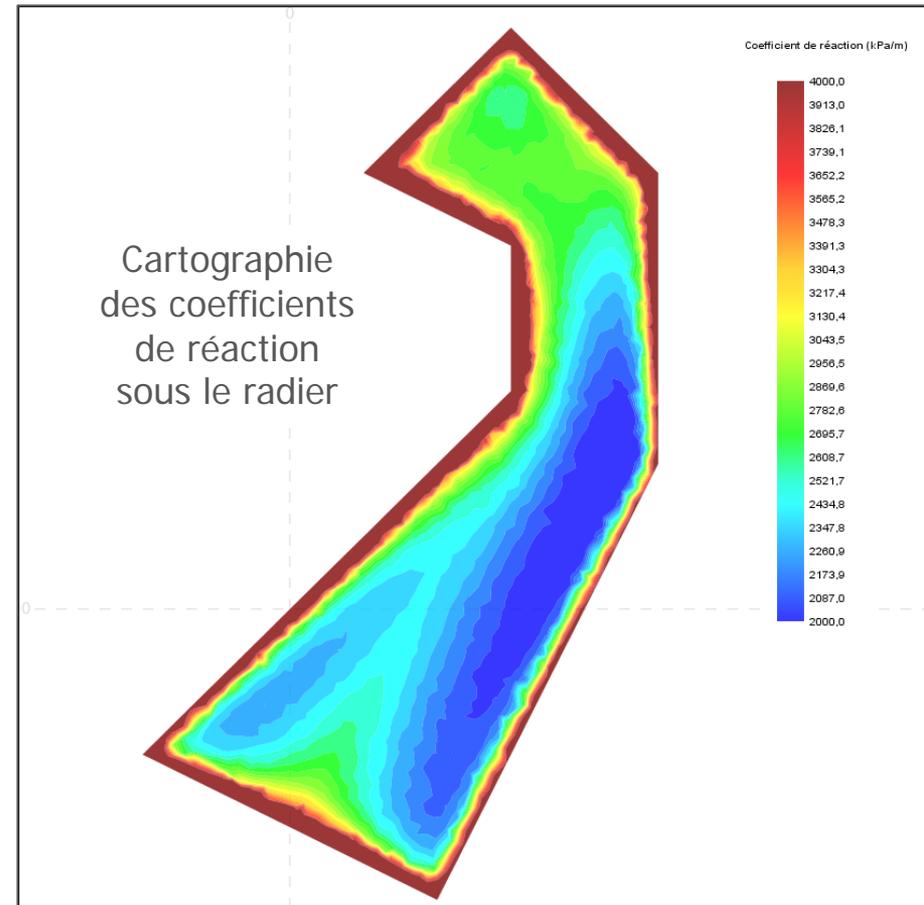
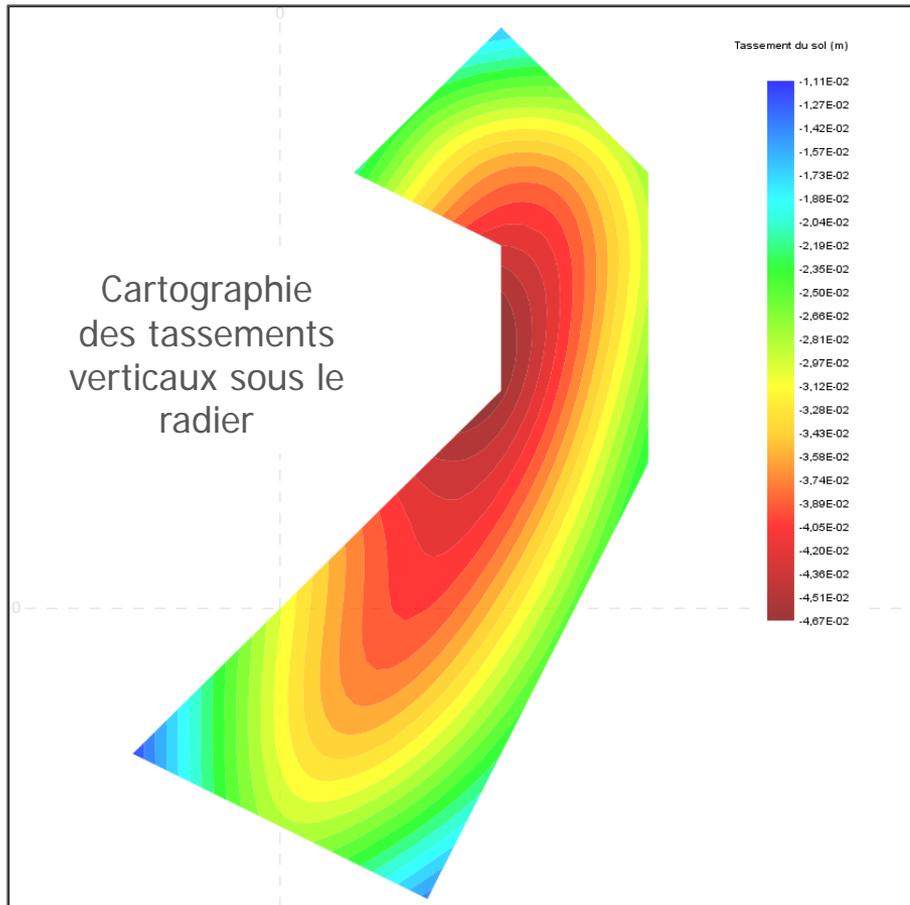


Ressorts ponctuels  
ou linéiques

- ⇒ Possibilité de faire des calculs « Structure » sur appuis rigides ou élastiques
- ⇒ Permet gérer de manière générale les conditions « aux limites » liées à l'interaction avec la superstructure (voiles, poteaux etc)
- ⇒ Les ressorts surfaciques sont non-linéaires (décollement/plastification autorisés)

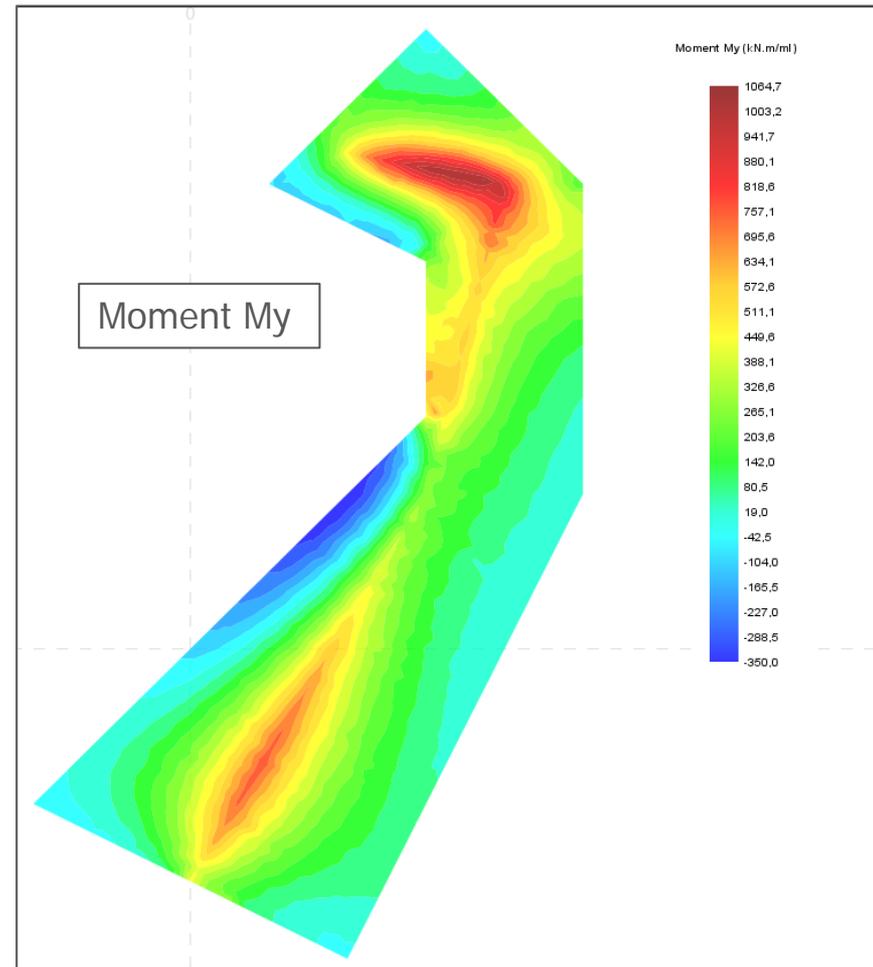
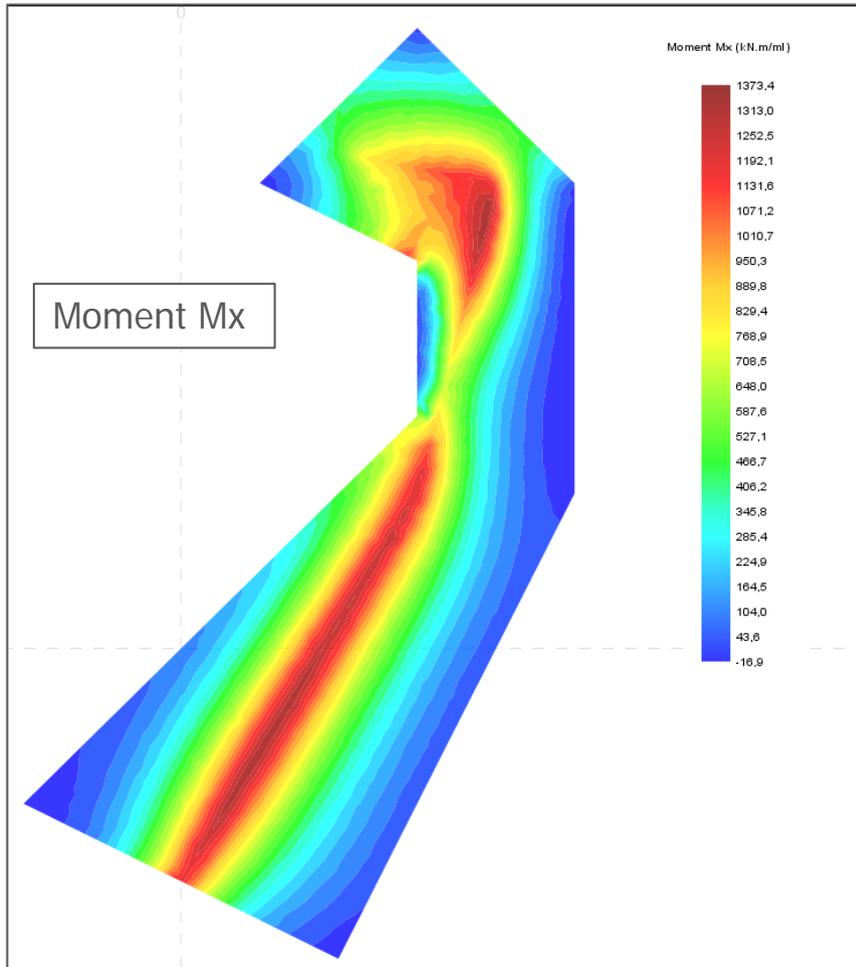
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Exploitation des résultats : tassements et réactions



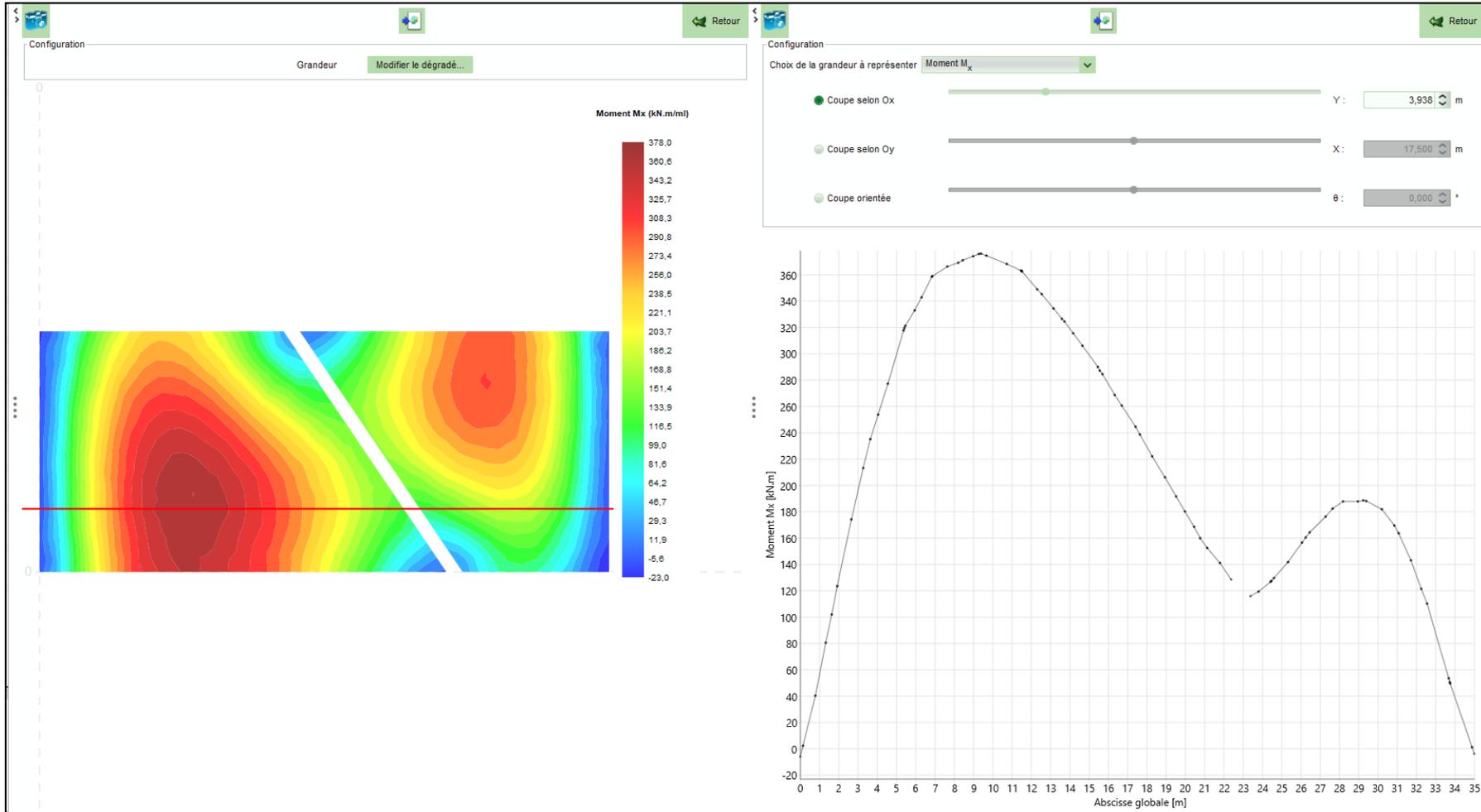
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Exploitation des résultats : moments fléchissants



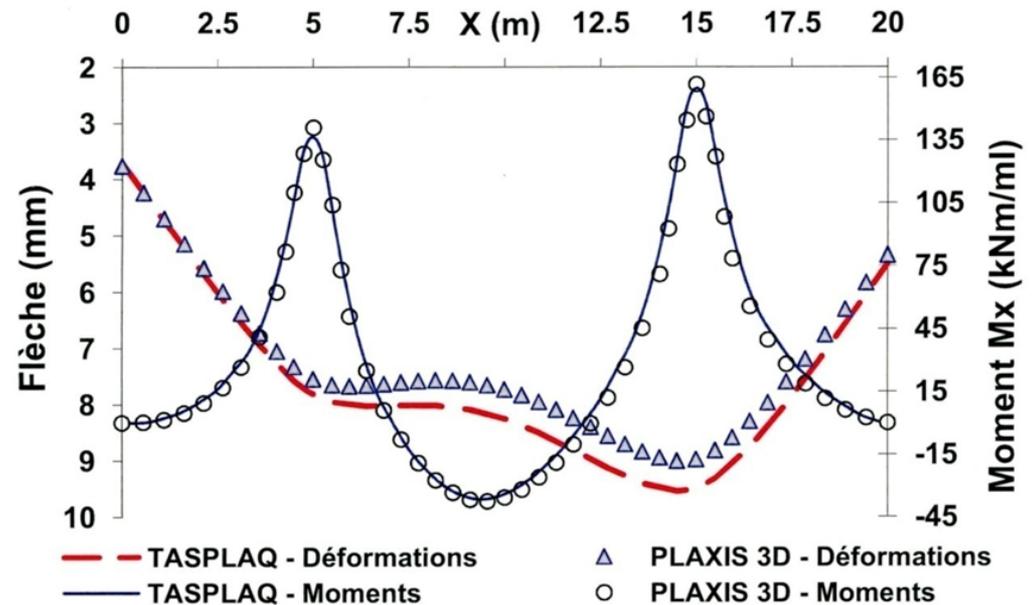
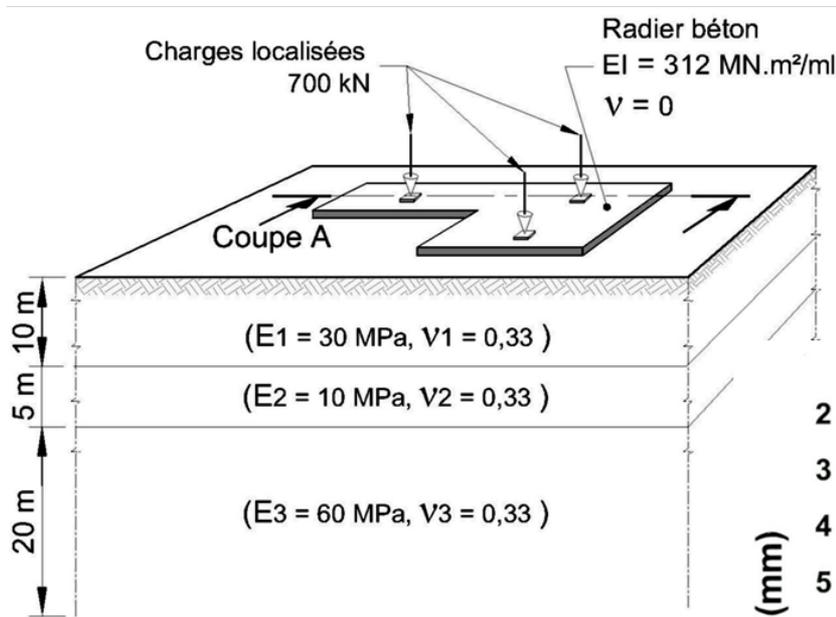
# Mise en œuvre dans Foxta v4

- Exploitation des résultats : moments fléchissants



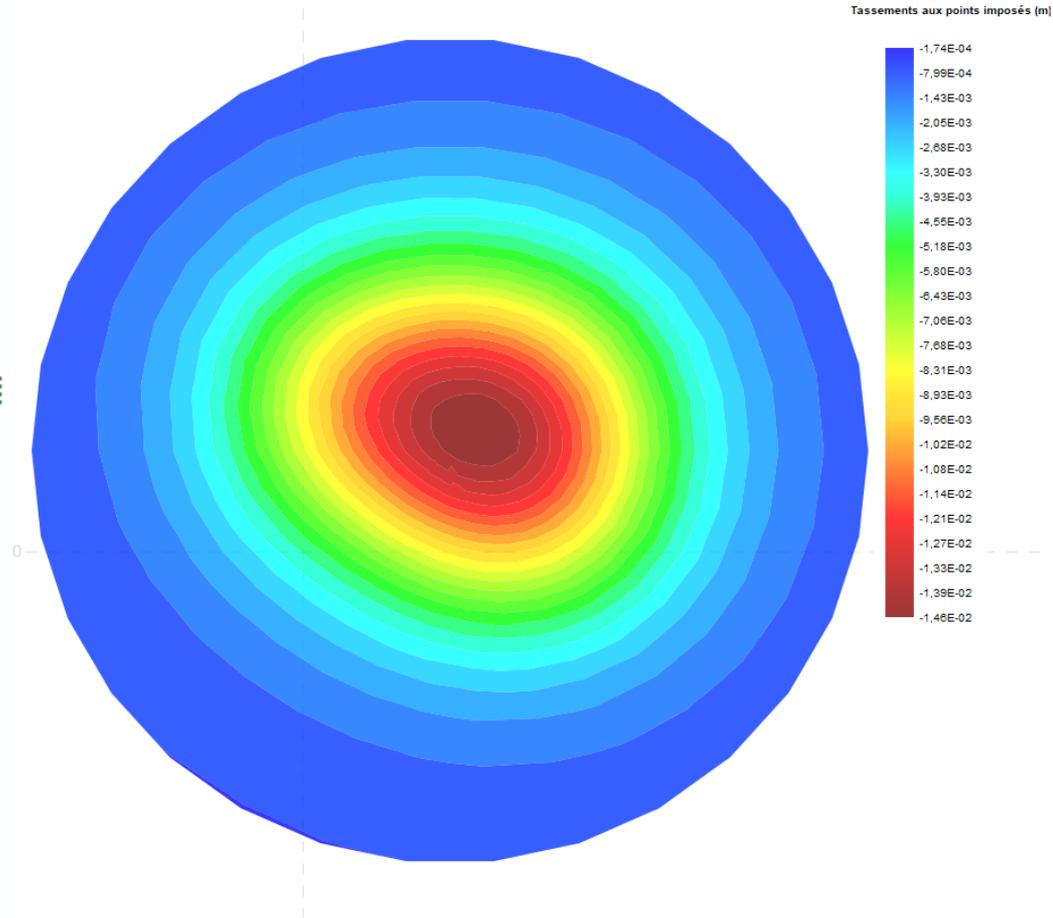
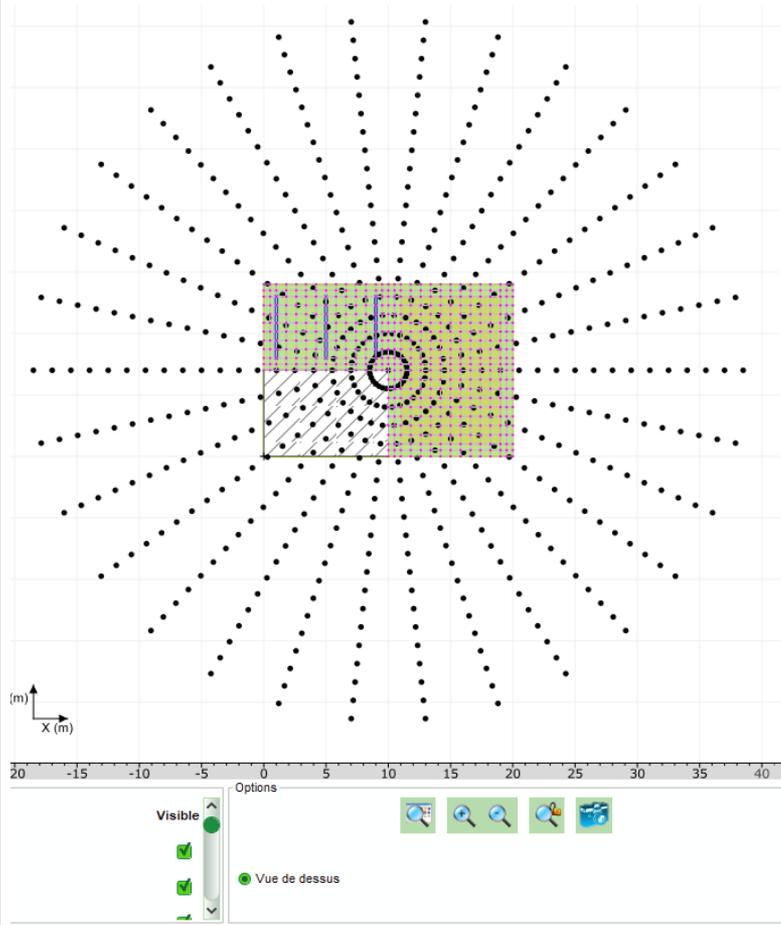
# Exemples d'ouvrage

- Radier sous charges localisées



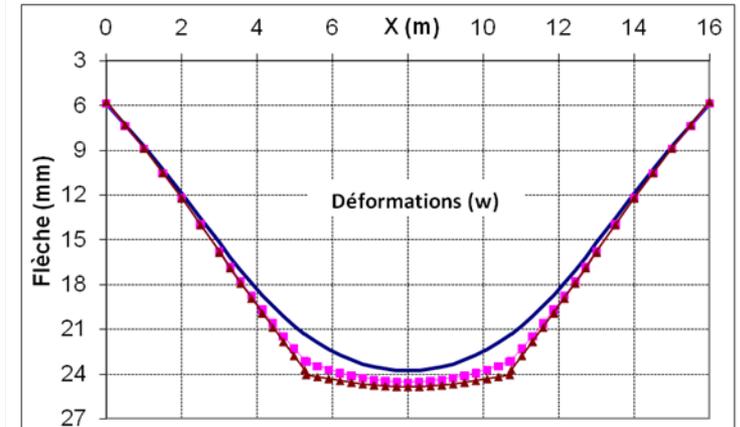
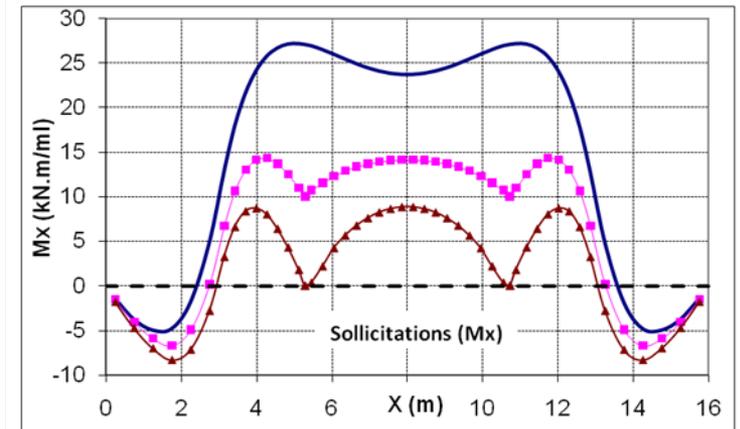
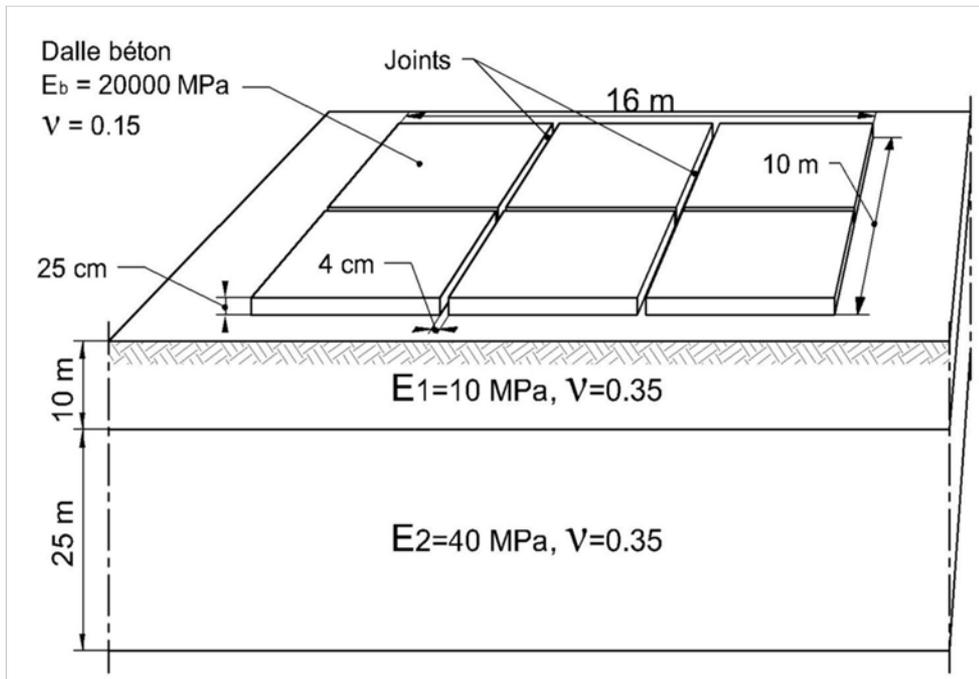
# Exemples d'ouvrage

- Zone d'influence géotechnique autour d'un radier



# Exemples d'ouvrage

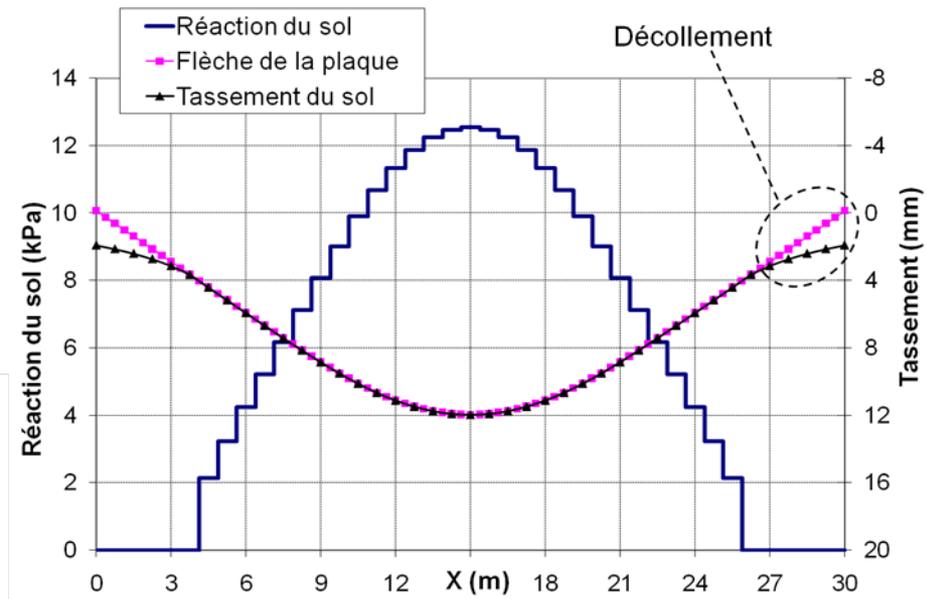
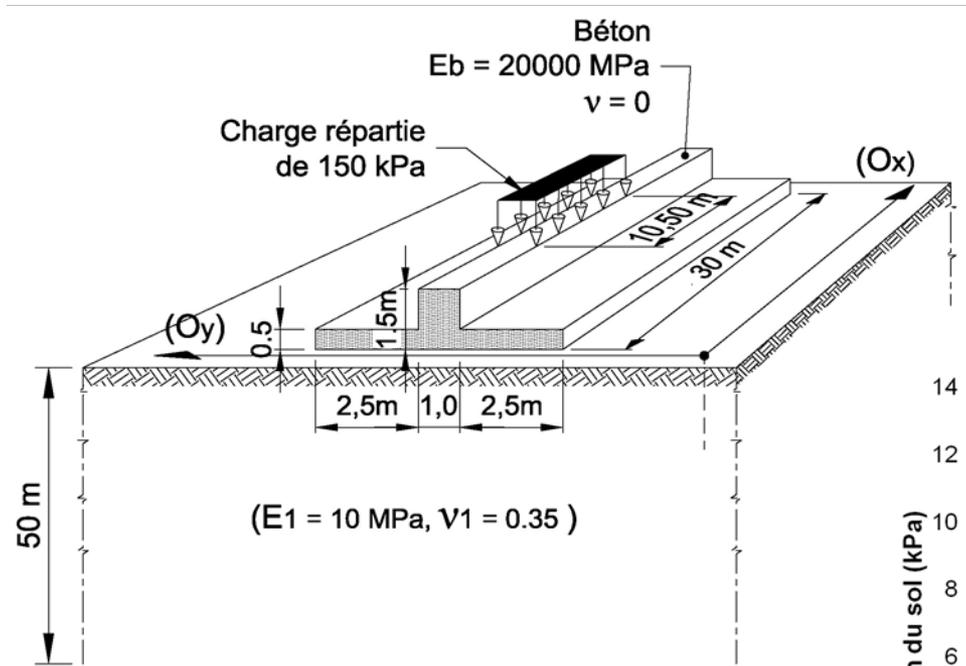
- Dallages avec différents systèmes de joints



— Dalle continue sans joints    - - - ■ - - - Dalle avec joints partiels  
 - - - ▲ - - - Dalle avec joints francs

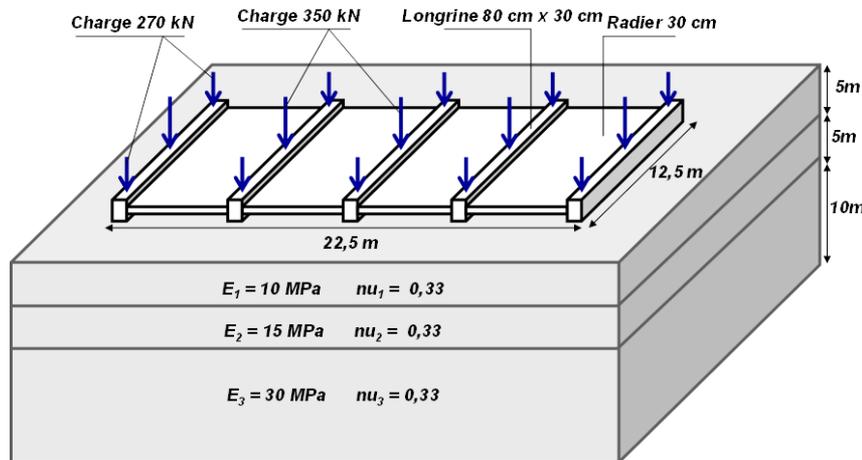
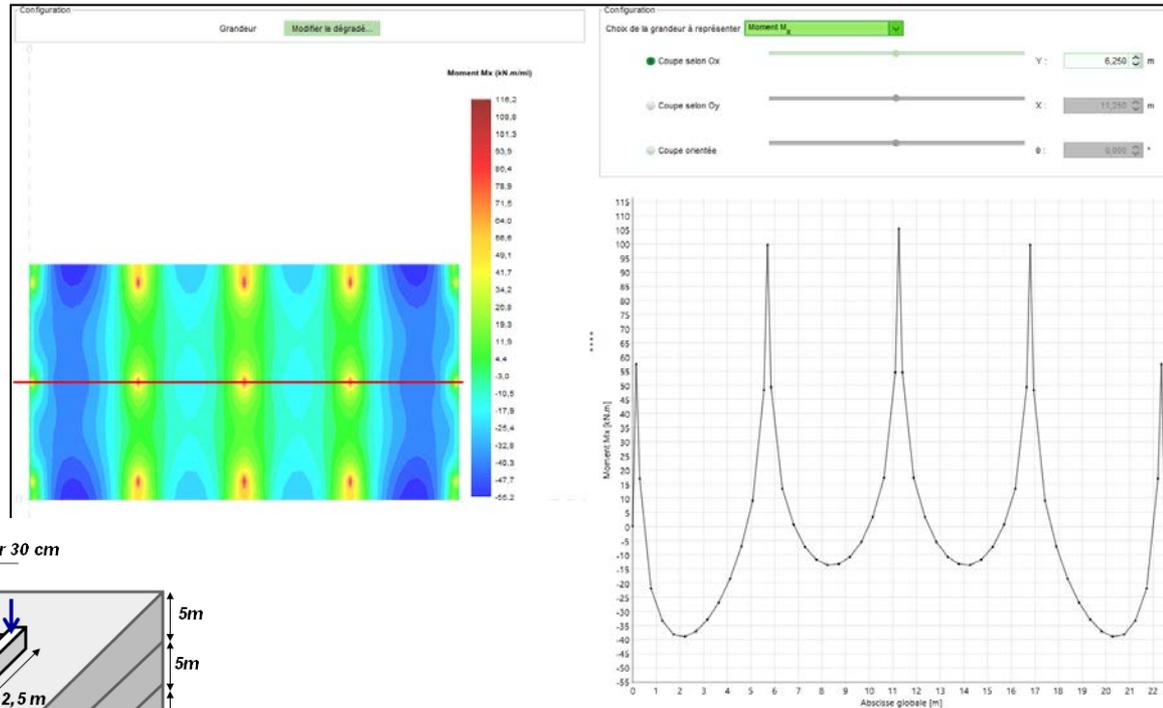
# Exemples d'ouvrage

- Poutre de roulement chargée localement



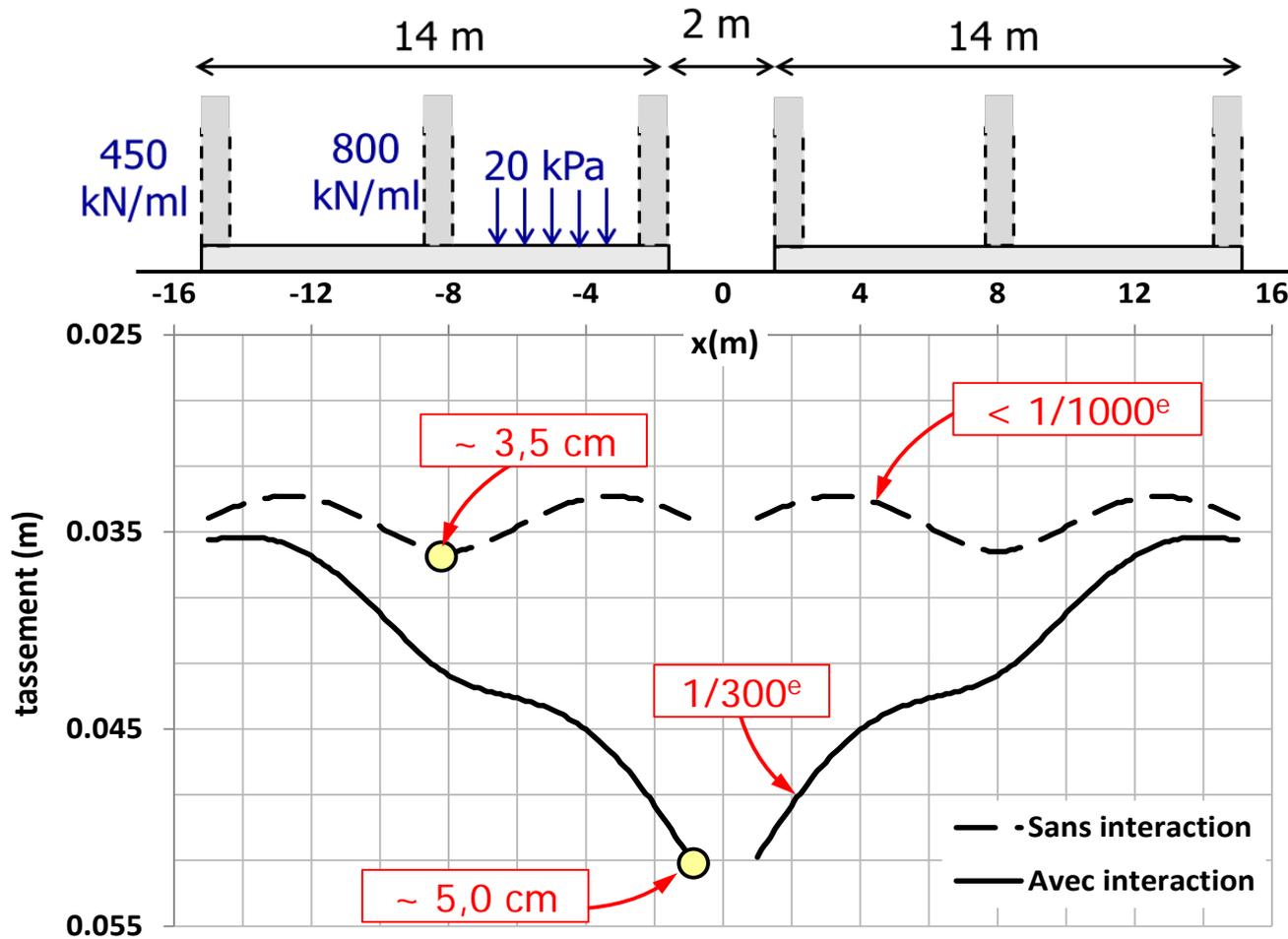
# Exemples d'ouvrage

- Applications : radier nervuré



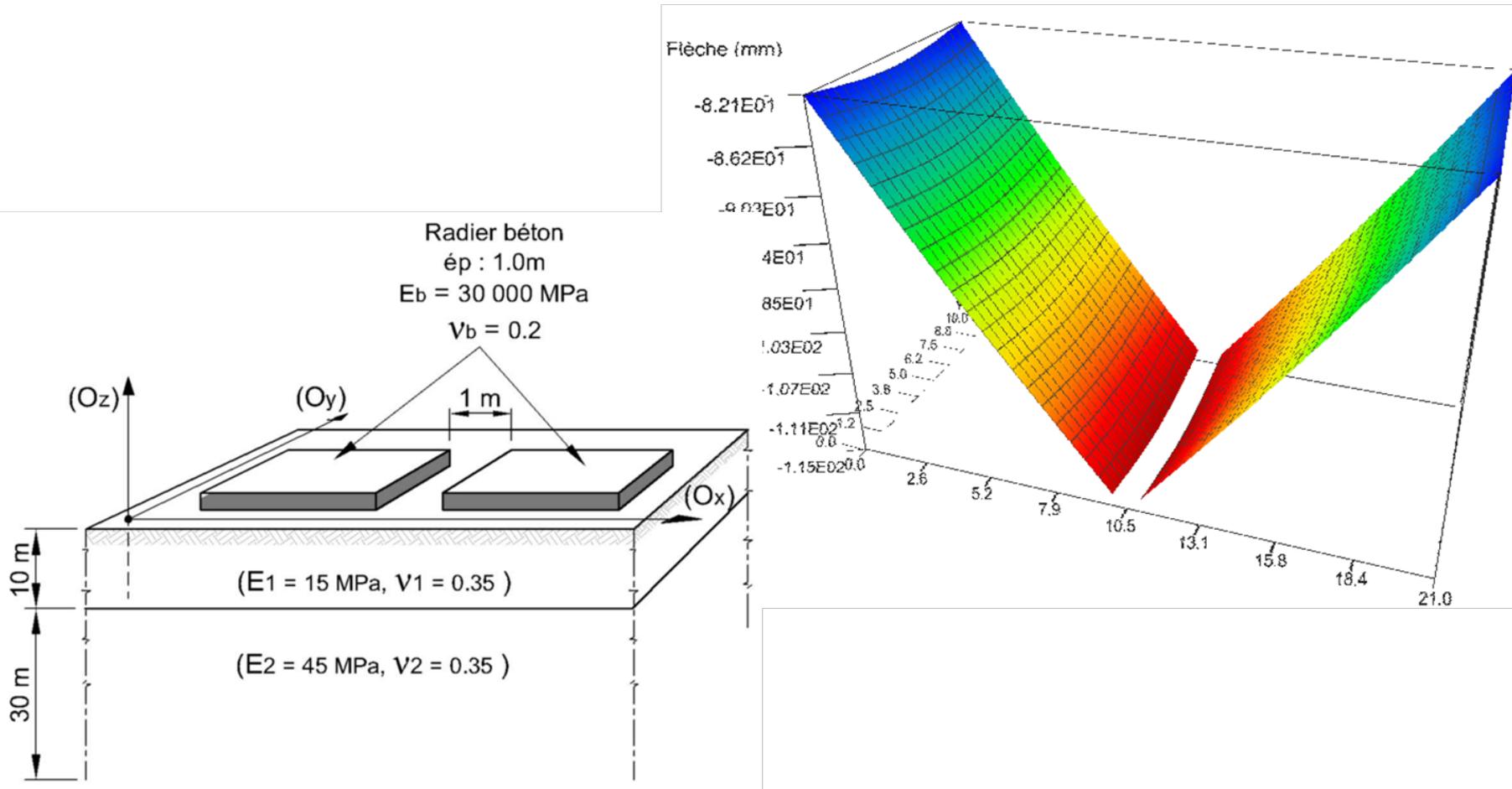
# Exemples d'ouvrage

- Interaction entre deux radiers voisins



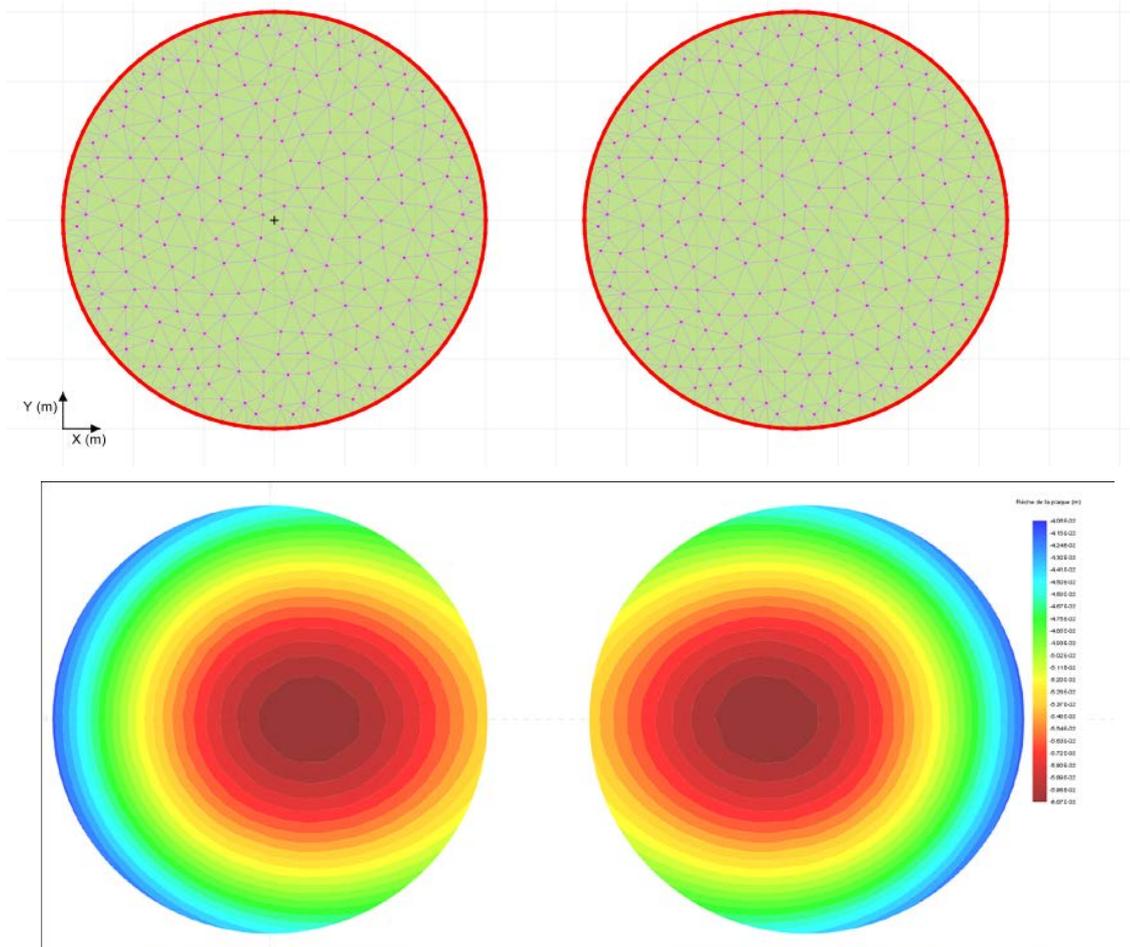
# Exemples d'ouvrage

- Interaction entre deux radiers voisins



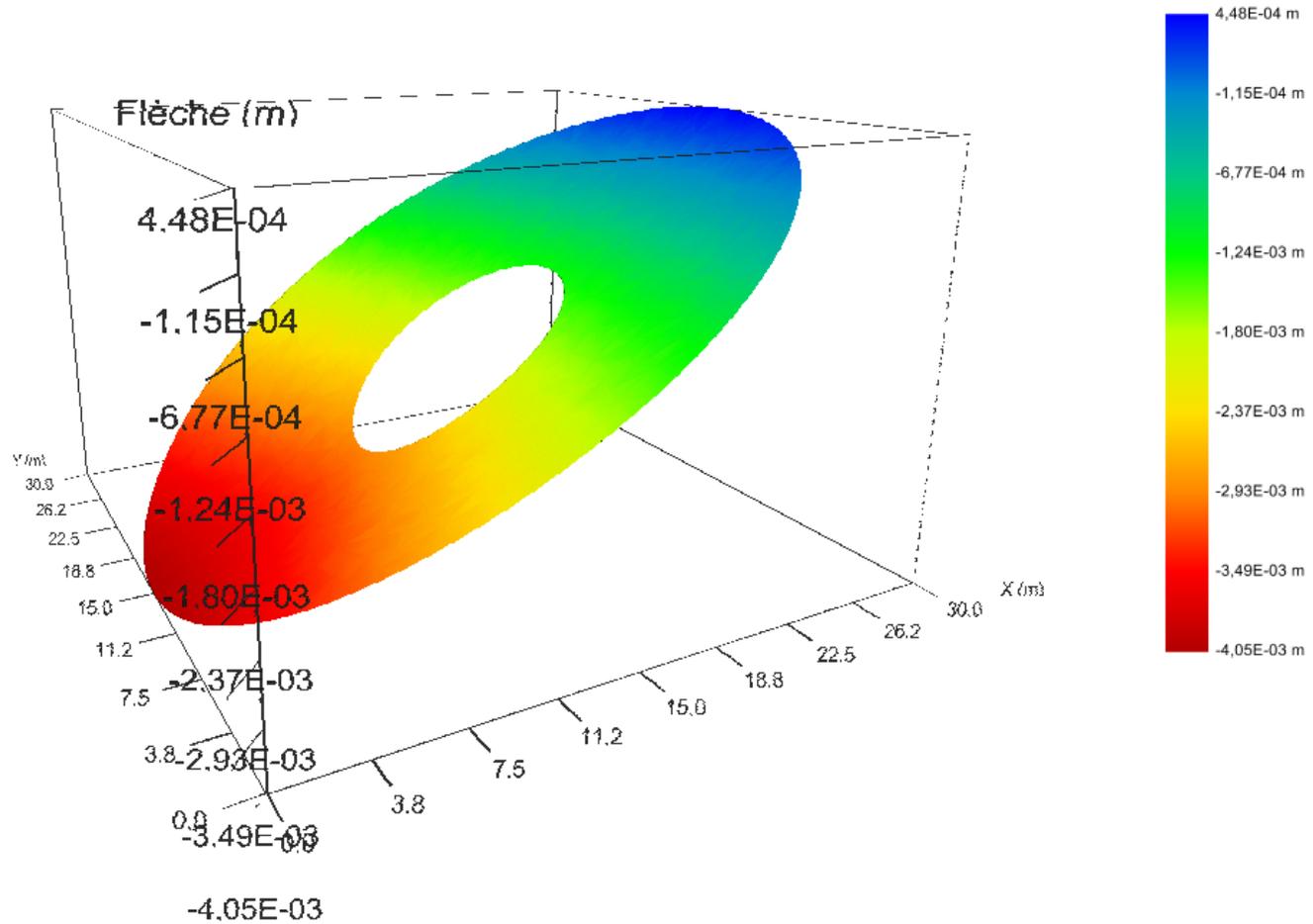
# Exemples d'ouvrage

- Deux réservoirs en interaction



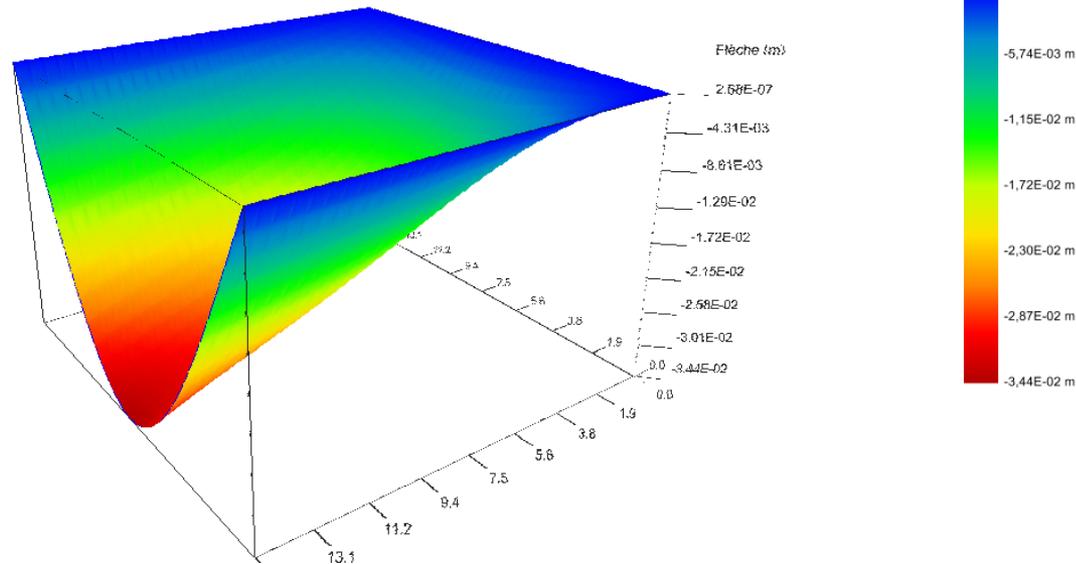
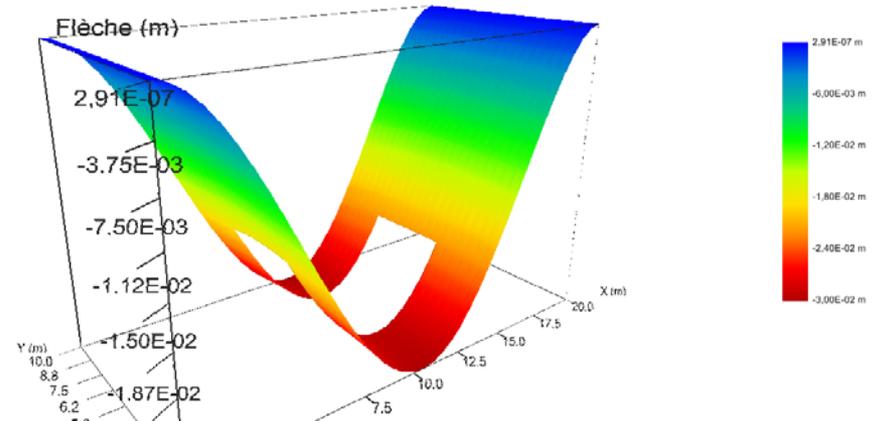
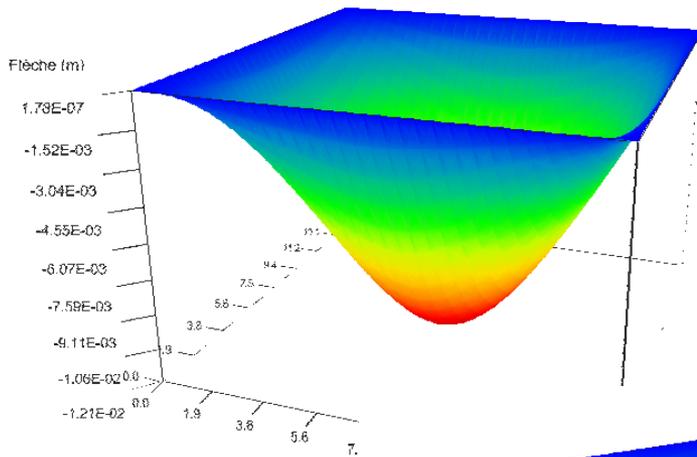
# Exemples d'ouvrage

- Fondation d'éolienne



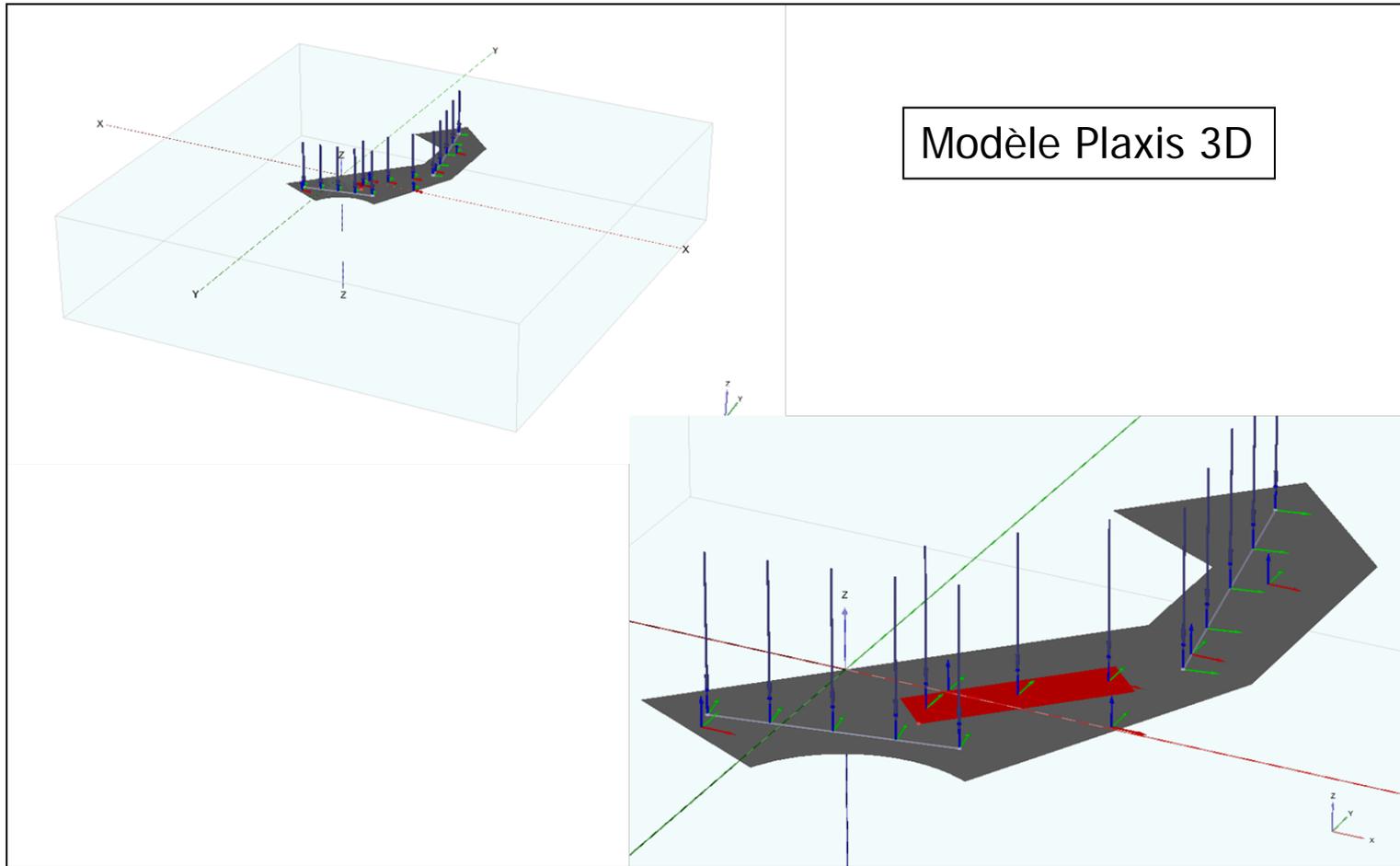
# Exemples d'ouvrage

- Dalle sur appuis



# Exemples d'ouvrage

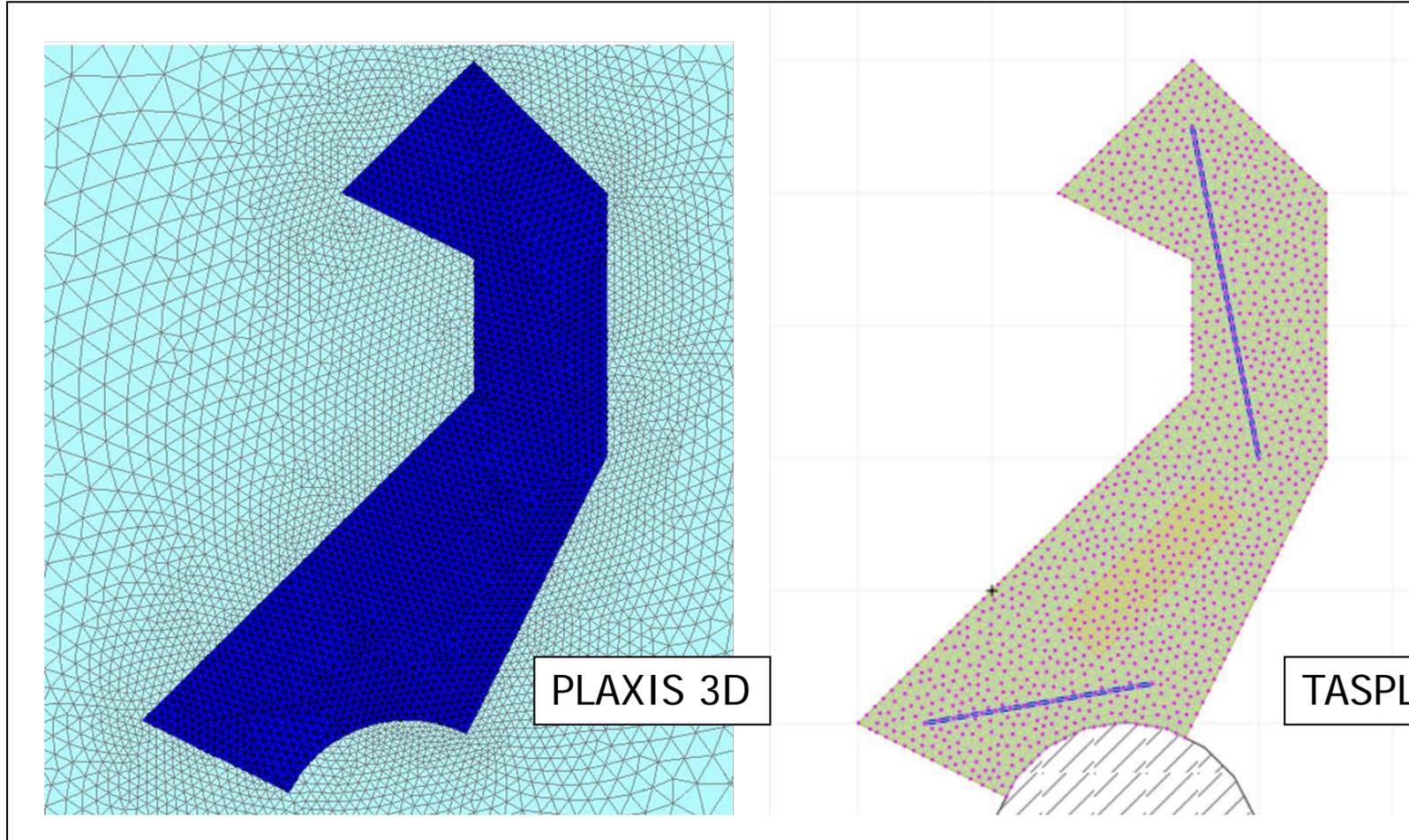
- Comparaison avec un traitement éléments finis 3D



Modèle Plaxis 3D

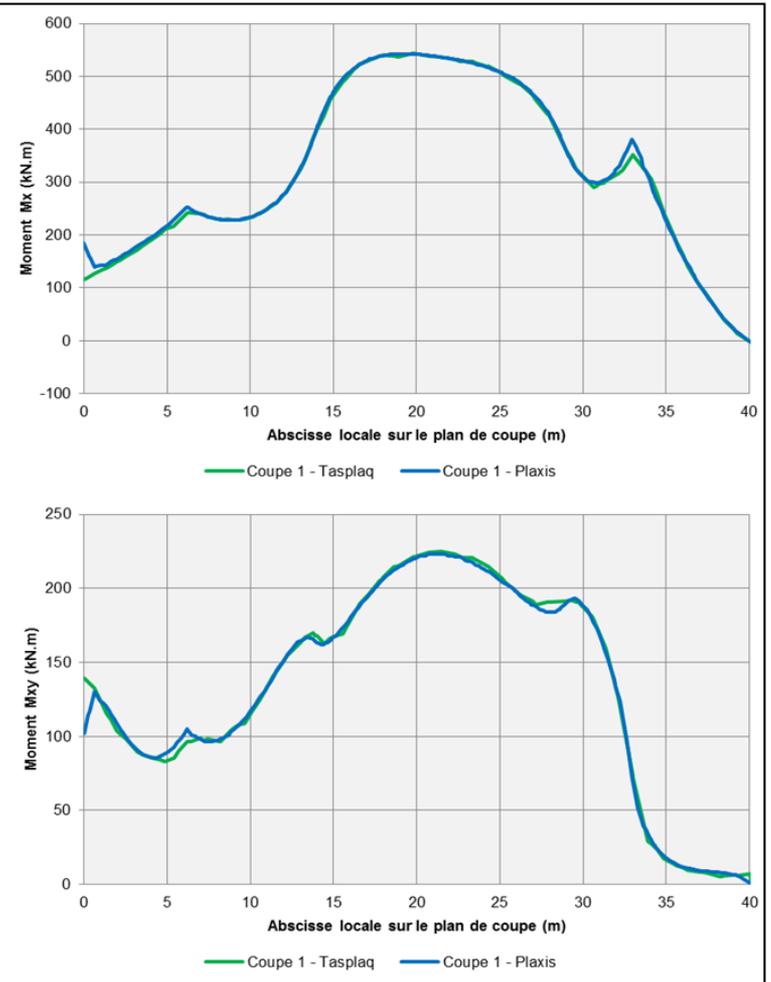
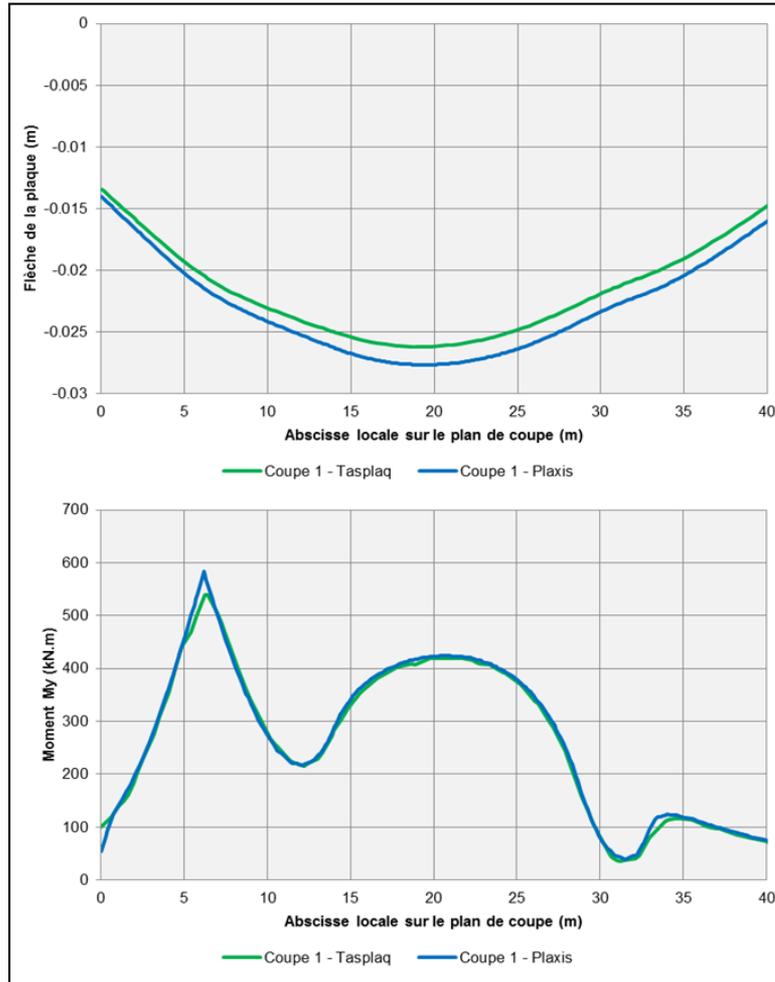
# Exemples d'ouvrage

- Comparaison avec un traitement éléments finis 3D



# Exemples d'ouvrage

- Comparaison avec un traitement éléments finis 3D



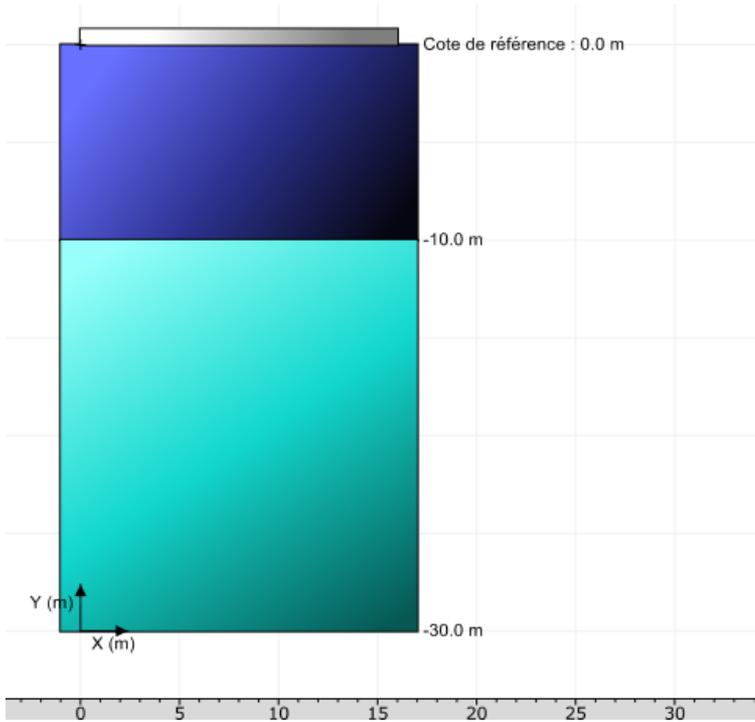
# Exercice 01

- Radier rectangulaire sous chargement linéique



# Exercice 01

- Définition des couches



Paramètres Couches Modélisation Maillage

### Données des couches

Définition des couches de sol

Cote de référence (m)

N°	Nom	Couleur	Z <sub>base</sub> [m]	E <sub>sol</sub> [kPa]	v	Pente-x	Pente-y
1	Couche 1		-10,00	2,00E04	0,33	0,000	0,000
2	Couche 2		-30,00	5,00E04	0,33	0,000	0,000

Base de données

Contrainte initiale

Y0 (kN/m<sup>3</sup>)   Définition d'un module de rechargement

Rapport E<sub>ur</sub>/E<sub>0</sub> (sans unité)

# Exercice 01

- Propriétés mécaniques et conditions de chargement

Paramètres
  Couches
  Modélisation
  Maillage

### Modélisation du projet

Liste des entités modélisées

Plaque	X [m]	Y [m]	B [m]	L [m]	$\theta$ [°]	E [kPa]	$\nu$	e [m]	$Z_{base}$ [m]
N°1 - Rectangle	0,00	0,00	16,00	10,00	0,0	1,00E07	0,15	0,80	0,00
Surcharge répartie	X [m]	Y [m]	B [m]	L [m]	$\theta$ [°]	Q [kPa]			
N°1 - Rectangle	0,00	0,00	16,00	10,00	0,0	20,00			
Surcharge linéique	$X_1$ [m]	$Y_1$ [m]	$X_2$ [m]	$Y_2$ [m]	Q [kN/m]				
N°1 - Ligne	1,00	1,00	1,00	9,00	300,00				
N°2 - Ligne	8,00	1,00	8,00	9,00	500,00				
N°3 - Ligne	15,00	1,00	15,00	9,00	300,00				

# Exercice 01 (suite)

- Traitement des tassements de recompression

Paramètres Couches Modélisation Maillage

## Modélisation du projet

Liste des entités modélisées

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

	X [m]	Y [m]	B [m]	L [m]	$\theta$ [°]	E [kPa]	$\nu$	e [m]	$z_{base}$ [m]
N°1 - Rectangle	0,00	0,00	16,00	10,00	0,0	1,00E07	0,15	0,80	-2,00

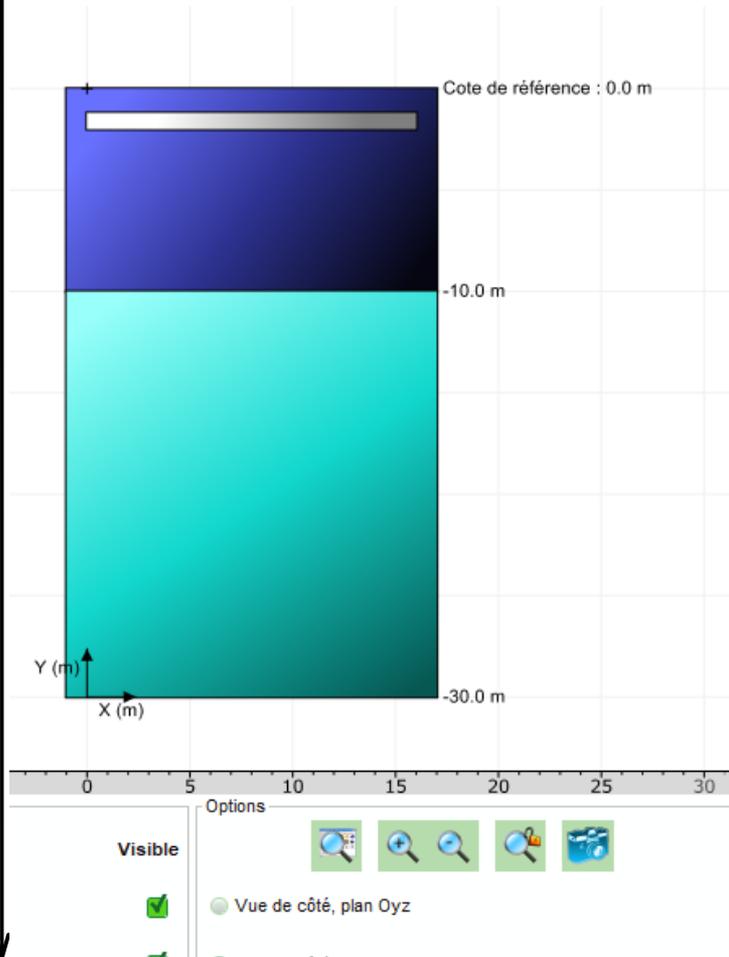
Modification de l'entité

	Plaque	Rectangle
Module de Young (kPa)	<input type="text" value="1,00E07"/>	X (m) <input type="text" value="0,00"/>
Coef. de Poisson (sans unité)	<input type="text" value="0,15"/>	Y (m) <input type="text" value="0,00"/>
Épaisseur (m)	<input type="text" value="0,80"/>	Largeur (m) <input type="text" value="16,00"/>
Cote de base (m)	<input style="border: 2px solid red;" type="text" value="-2,00"/>	Longueur (m) <input type="text" value="10,00"/>
		Orientation (°) <input type="text" value="0,0"/>

Valider Annuler

# Exercice 01 (suite)

- Traitement des tassements de recompression



Radier trapézoïdal Radier trapézoïdal Radier rectangulaire Radier rectangulaire

Paramètres Couches Modélisation Maillage

### Données des couches

Définition des couches de sol

Cote de référence (m) 0,00

N°	Nom	Couleur	Z <sub>base</sub> [m]	E <sub>sol</sub> [kPa]	v	Pente-x	Pente-y
1	Couche 1		-10,00	2,00E04	0,33	0,000	0,000
2	Couche 2		-30,00	5,00E04	0,33	0,000	0,000

Base de données

Contrainte initiale

Y0 (kN/m3) 20,00  Définition d'un module de rechargement

Rapport E<sub>ur</sub>/E<sub>0</sub> (sans unité) 3,000

Interface plaque/support

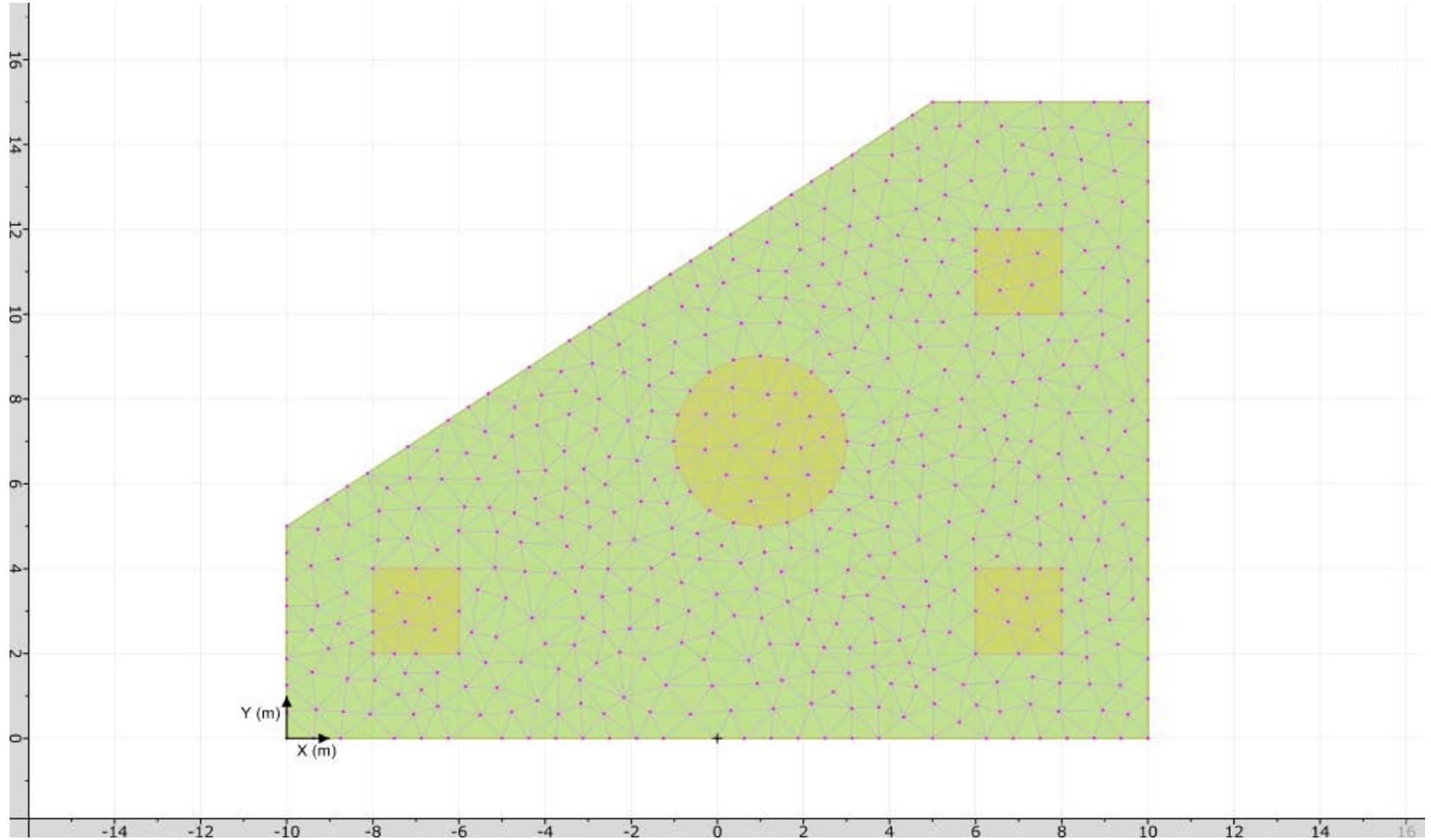
Seuil de décollement (kPa) 0

Seuil de plastification (kPa) 1000

Décollement/plastification automatique

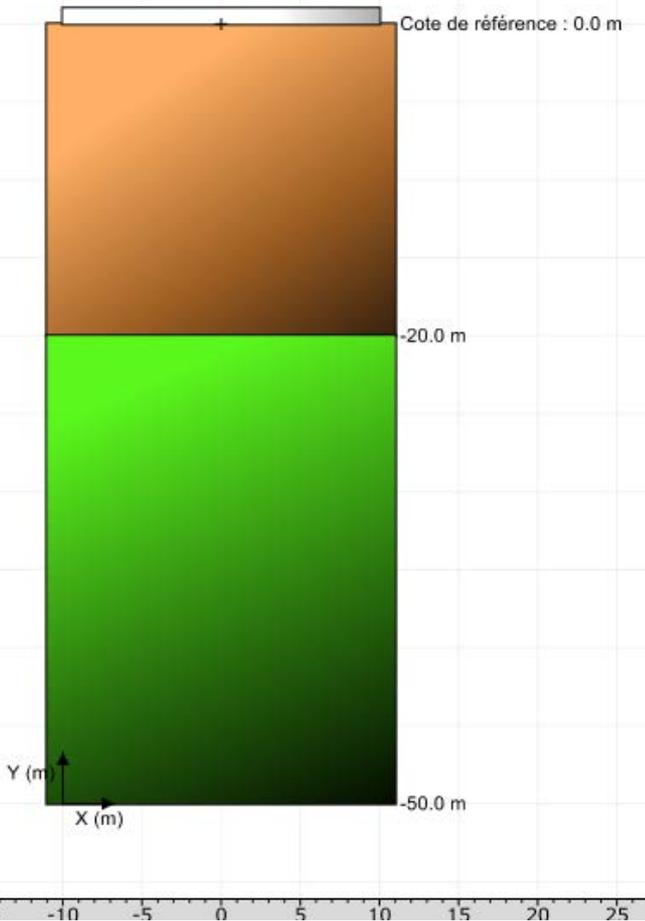
# Exercice 02

- Radier trapézoidal



# Exercice 02

- Définition des couches



Paramètres Couches Modélisation Maillage

### Données des couches

Définition des couches de sol

Cote de référence (m)

N°	Nom	Couleur	Z <sub>base</sub> [m]	E <sub>sol</sub> [kPa]	v	Pente-x	Pente-y
1	Couche 1		-20,00	3,00E04	0,33	0,000	0,000
2	Couche 2		-50,00	8,00E04	0,33	0,000	0,000

Base de données

Contrainte initiale

Y0 (kN/m3)   Définition d'un module de rechargement

Rapport E<sub>u</sub>/E<sub>0</sub> (sans unité)

Interface plaque/support

Seuil de décollement (kPa)

Seuil de plastification (kPa)

Décollement/plastification automatique

# Exercice 02

- Propriétés mécaniques et conditions de chargement

Paramètres Couches Modélisation Maillage

### Modélisation du projet

Liste des entités modélisées

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

Plaque	n	S [m <sup>2</sup> ]	E [kPa]	v	e [m]	Z <sub>base</sub> [m]
N°1 - Polygone	5	225,00	1,00E07	0,15	1,00	0,00
Surcharge répartie	n	S [m <sup>2</sup> ]	Q [kPa]			
N°1 - Polygone	5	225,00	25,00			
Surcharge répartie	X [m]	Y [m]	r [m]	Q [kPa]		
N°1 - Rond	1,00	7,00	2,00	500,00		
Surcharge répartie	X [m]	Y [m]	L [m]	θ [°]	Q [kPa]	
N°1 - Carré	-8,00	2,00	2,00	0,0	900,00	
N°2 - Carré	6,00	2,00	2,00	0,0	900,00	
N°3 - Carré	6,00	10,00	2,00	0,0	900,00	

# Exercice 02

- Propriétés mécaniques et conditions de chargement

Paramètres Couches Modélisation Maillage

## Modélisation du projet

Liste des entités modélisées

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

	n	S [m <sup>2</sup> ]	E [kPa]	v	e [m]	Z <sub>base</sub> [m]
N°1 - Polygone	5	225,00	1,00E07	0,15	1,00	0,00

**Plaque**

Module de Young (kPa)

Coef. de Poisson (sans unité)

Épaisseur (m)

Cote de base (m)

**Polygone**

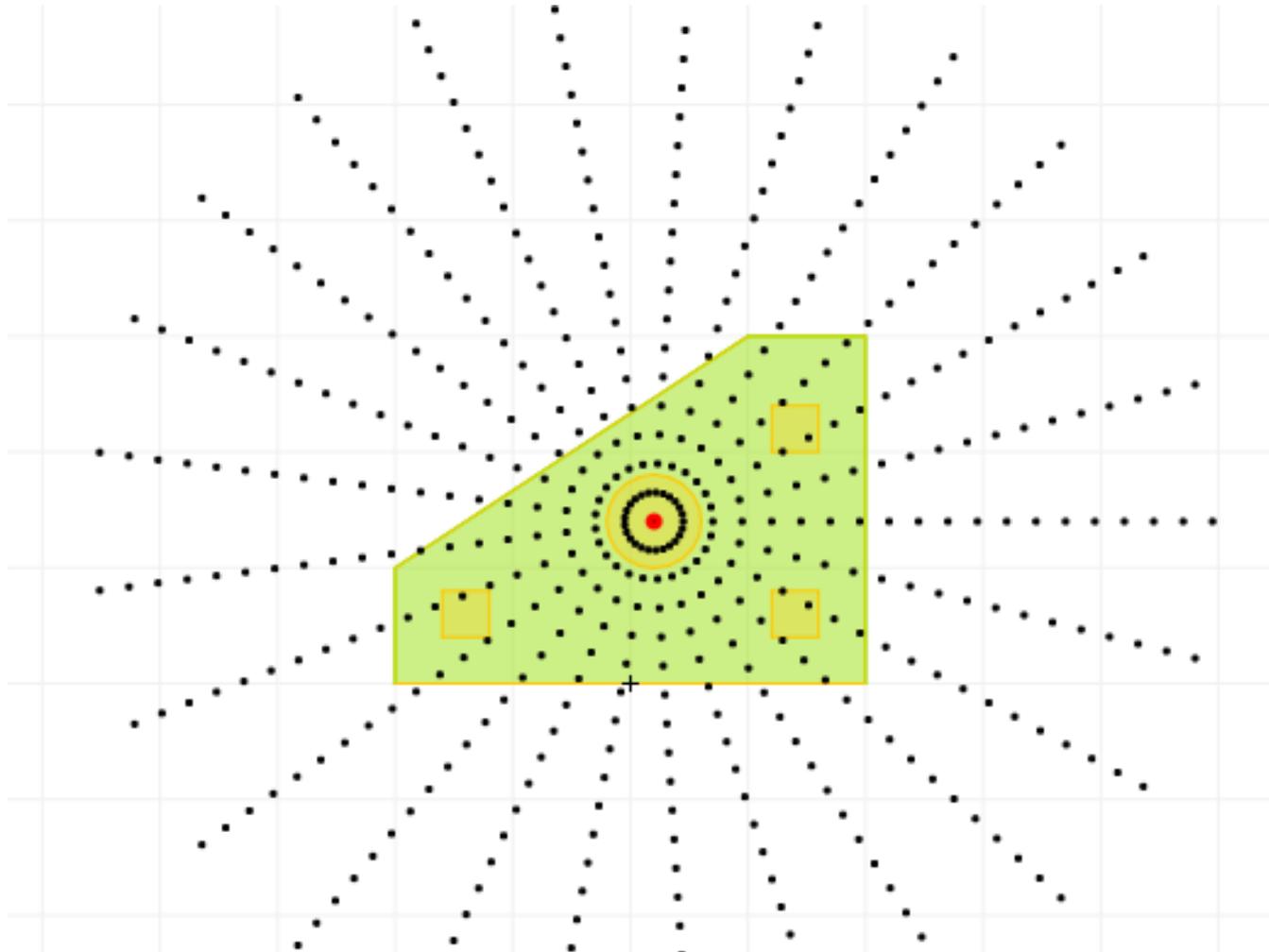
Assistant Polygones

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



## Exercice 02 (suite 1)

- Etude de la zone d'influence géotechnique



# Exercice 02 (suite 1)

- Etude de la zone d'influence géotechnique

	X [m]	Y [m]	Groupe	Z [m]
● Points sur un disque				
● Points de calcul imposés				
N°1 - Point	1,00	7,00	1	0,00
N°2 - Point	2,25	7,00	1	0,00
N°3 - Point	2,21	7,31	1	0,00
N°4 - Point	2,10	7,60	1	0,00
N°5 - Point	1,91	7,86	1	0,00

## Exercice 02 (suite 2)

- Prise en compte d'un trou dans le radier



# Exercice 02 (suite 2)

- Prise en compte d'un trou dans le radier

Zone sans plaque ▼

Rond ▼

Aucune propriété à définir

Valider
Annuler

Zone sans plaque

N°1 - Rond

X [m]	Y [m]	r [m]
1,00	7,00	3,00

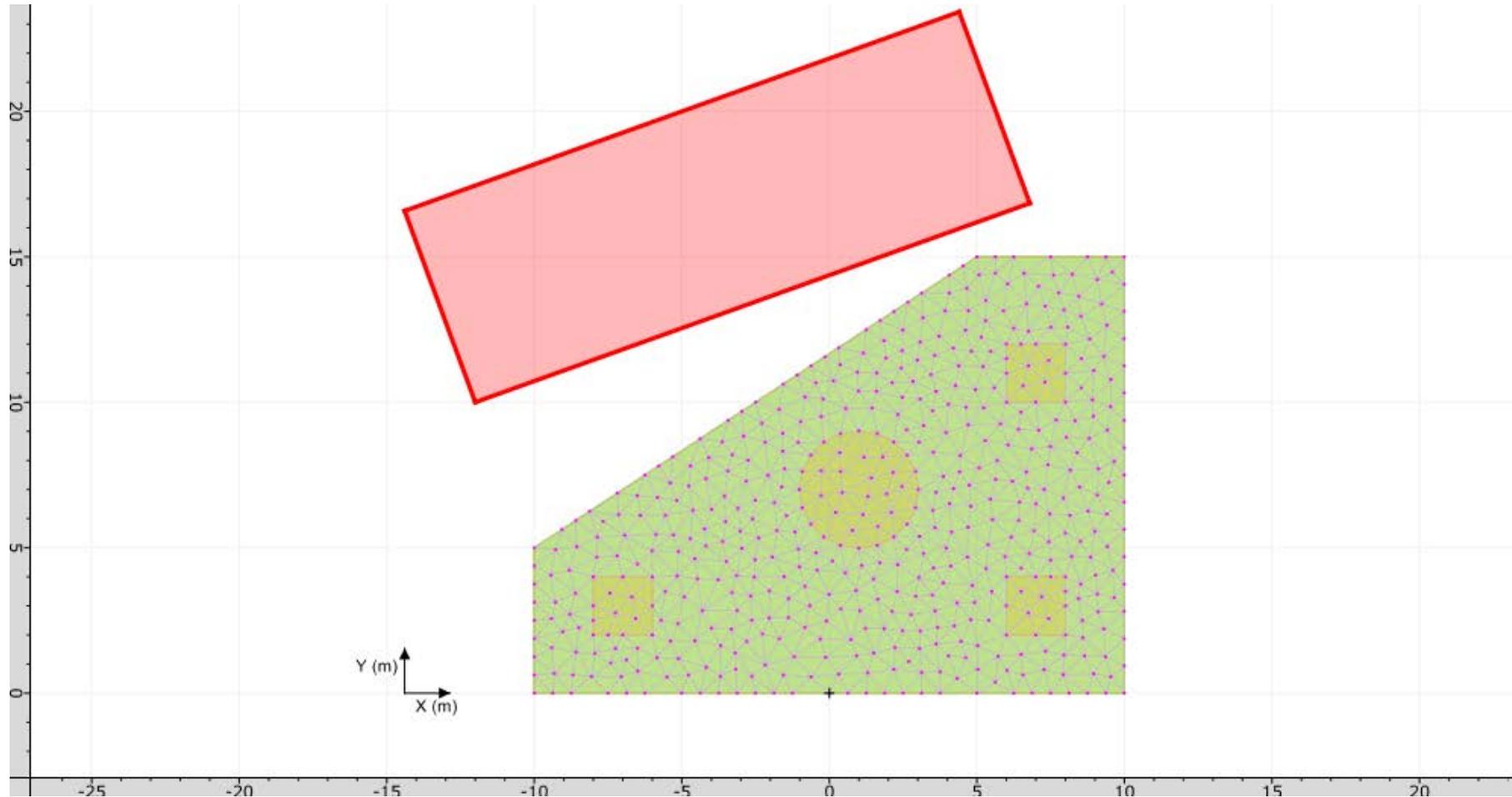
Maillage

### Modélisation du projet

Modifier	Supprimer	Tout supprimer...	Imprimer
Zone sans plaque			
n	S [m <sup>2</sup> ]	E [kPa]	
5	225,00	1,00E07	
Zone sans plaque			
n	S [m <sup>2</sup> ]	Q [kPa]	
5	225,00	25,00	
Zone sans plaque			
X [m]	Y [m]	L [m]	
-8,00	2,00	2,00	
6,00	2,00	2,00	
6,00	10,00	2,00	

## Exercice 02 (suite 3)

- Interaction avec un remblai voisin



# Exercice 02 (suite 3)

- Interaction avec un remblai voisin

Paramètres Couches Modélisation Maillage

**Modification de l'entité**

**Chargement extérieur**

Densité (kPa)

Cote (m)

**Rectangle**

X (m)

Y (m)

Largeur (m)

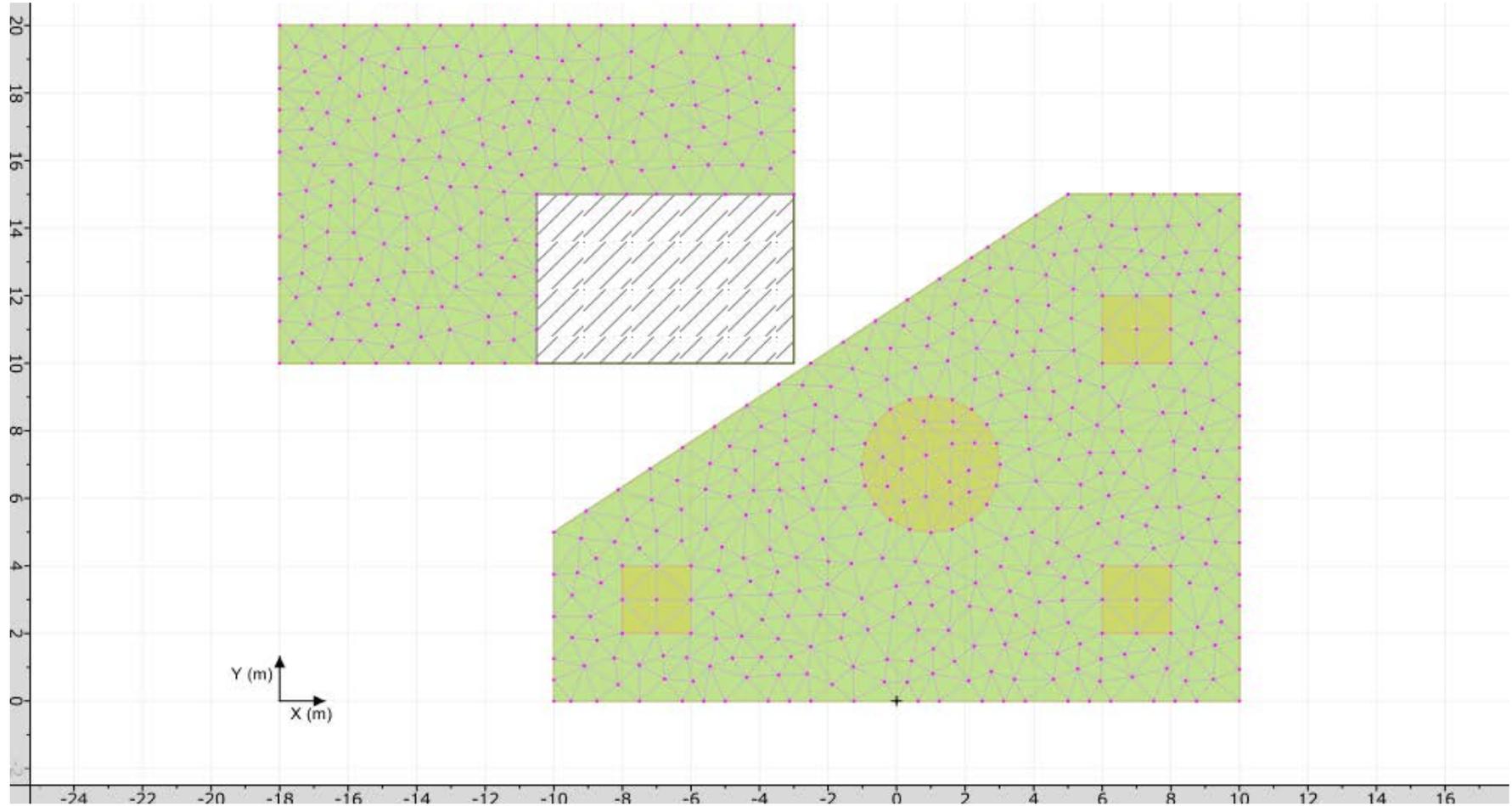
Longueur (m)

Orientation (°)

	X	Y	B	L	θ	Q	Z
	[m]	[m]	[m]	[m]	[°]	[kPa]	[m]
N°1 - Rectangle	-12,00	10,00	20,00	7,00	20,0	200,00	0,00

## Exercice 02 (suite 3)

- Interaction avec un radier voisin



## Exercice 02 (suite 3)

- Interaction avec un radier voisin

	X [m]	Y [m]	B [m]	L [m]	$\theta$ [°]	E [kPa]	$\nu$	e [m]	$z_{base}$ [m]
N°1 - Rectangle	-18,00	10,00	15,00	10,00	0,0	1,00E07	0,15	0,60	-3,00

M Modification de l'entité ✕

Plaque ▼	Rectangle ▼
Module de Young (kPa) <input type="text" value="1,00E07"/>	X (m) <input type="text" value="-18,00"/>
Coef. de Poisson (sans unité) <input type="text" value="0,15"/>	Y (m) <input type="text" value="10,00"/>
Épaisseur (m) <input type="text" value="0,60"/>	Largeur (m) <input type="text" value="15,00"/>
Cote de base (m) <input type="text" value="-3,00"/>	Longueur (m) <input type="text" value="10,00"/>
	Orientation (°) <input type="text" value="0,0"/>
<input type="button" value="Valider"/> <input type="button" value="Annuler"/>	

# Exercice 02 (suite 3)

- Interaction avec un radier voisin

	Plaque	n	S [m <sup>2</sup> ]	E [kPa]	v	e [m]	Z <sub>base</sub> [m]
N°1 - Polygone		5	225,00	1,00E07	0,15	1,00	0,00

	Surcharge répartie	X [m]	Y [m]	r [m]	Q [kPa]
N°1 - Rond		1,00	7,00	2,00	500,00

	Surcharge répartie	X [m]	Y [m]	B [m]	L [m]	θ [°]	Q [kPa]
N°1 - Rectangle		-18,00	10,00	15,00	10,00	0,0	120,00

**Modification de l'entité** ✕

 Surcharge répartie ▼	 Rectangle ▼
Densité (kPa) <input style="width: 100%;" type="text" value="120,00"/>	X (m) <input style="width: 100%;" type="text" value="-18,00"/>
	Y (m) <input style="width: 100%;" type="text" value="10,00"/>
	Largeur (m) <input style="width: 100%;" type="text" value="15,00"/>
	Longueur (m) <input style="width: 100%;" type="text" value="10,00"/>
	Orientation (°) <input style="width: 100%;" type="text" value="0,0"/>

# Exercice 02 (suite 3)

- Interaction avec un radier voisin

Paramètres ✓ Couches ✓ Modélisation ✓ Maillage ✓

Modélisation du radier

Modification de l'entité

Zone sans plaque ▼

Rectangle ▼

Aucune propriété à définir

X (m) -10,50

Y (m) 10,00

Largeur (m) 7,50

Longueur (m) 5,00

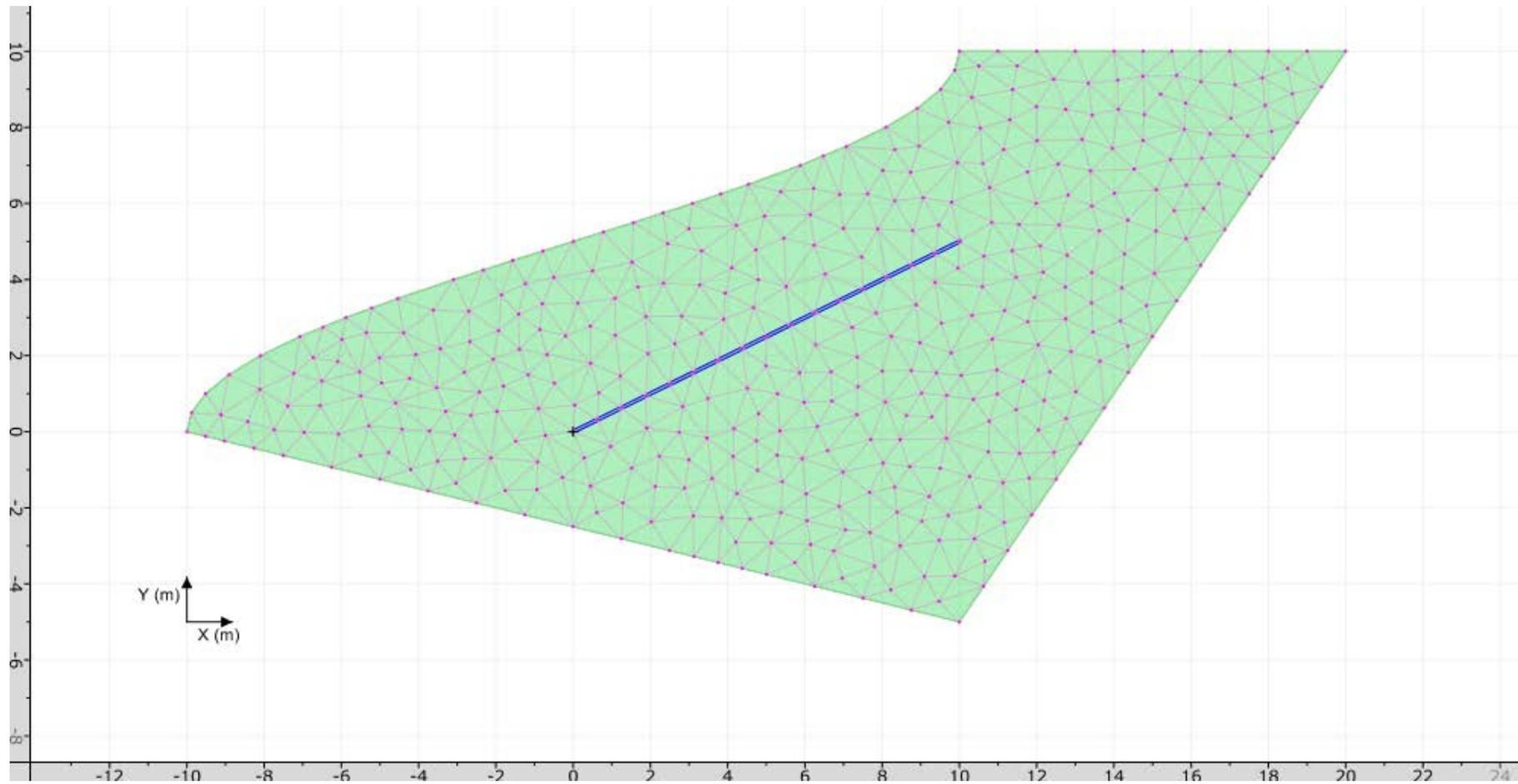
Orientation (°) 0,0

Valider Annuler

	X	Y	B	L	θ
	[m]	[m]	[m]	[m]	[°]
N°1 - Rectangle	-10,50	10,00	7,50	5,00	0,0

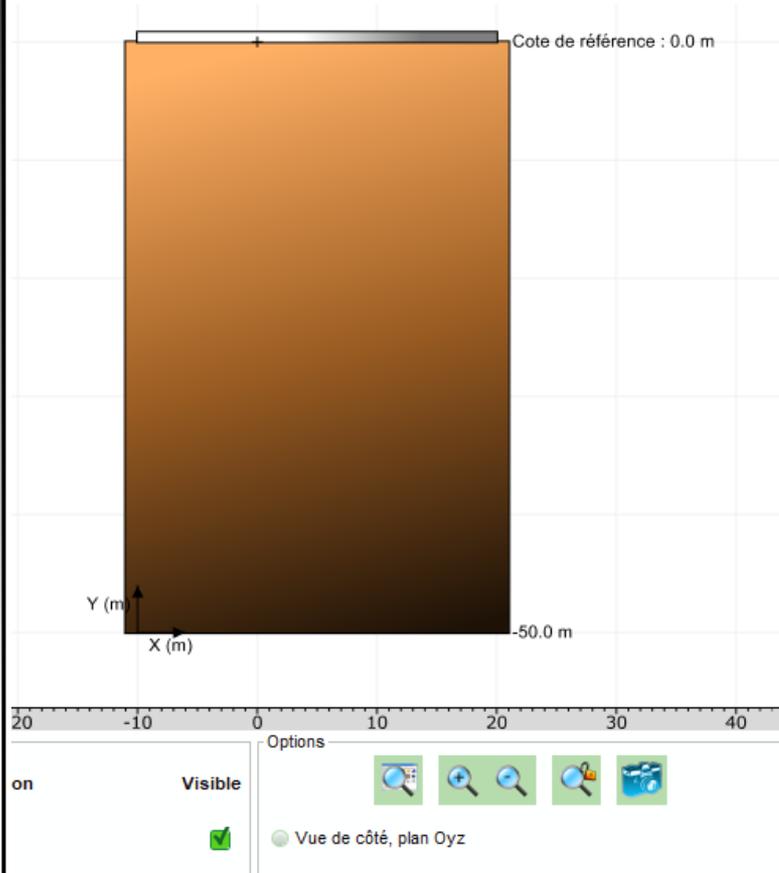
# Exercice 03

- Décollement local d'un radier polygonal



# Exercice 03

- Définition des couches



Paramètres Couches Modélisation Maillage

### Données des couches

Définition des couches de sol

Cote de référence (m)

N°	Nom	Couleur	Z <sub>base</sub> [m]	E <sub>sol</sub> [kPa]	v	Pente-x	Pente-y
1	Couche 1		-50,00	5,00E04	0,33	0,000	0,000

Base de données

Contrainte initiale

Y0 (kN/m3)   Définition d'un module de rechargement

Rapport E<sub>ur</sub>/E<sub>0</sub> (sans unité)

Interface plaque/support

Seuil de décollement (kPa)

Seuil de plastification (kPa)

Décollement/plastification automatique

# Exercice 03

- Définition du radier et charges supportées

Paramètres
  Couches
  Modélisation
  Maillage

## Modélisation du projet

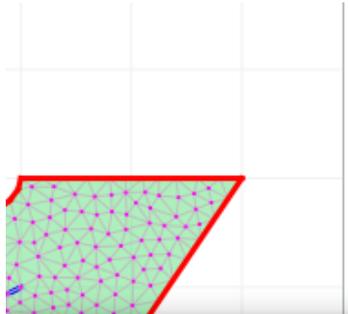
Liste des entités modélisées

Afficher :

	n	S [m <sup>2</sup> ]	E [kPa]	v	e [m]	z <sub>base</sub> [m]
 Plaque						
N°1 - Polygone	23	225,00	1,00E07	0,15	0,80	0,00
	X <sub>1</sub> [m]	Y <sub>1</sub> [m]	X <sub>2</sub> [m]	Y <sub>2</sub> [m]	Q [kN/m]	
 Surcharge linéique						
N°1 - Ligne	0,00	0,00	10,00	5,00	500,00	

# Exercice 03

- Définition du radier et charges supportées



### Modélisation du projet

Liste des entités modélisées

Créer nouveau...
Créer groupe...
Dupliquer
Supprimer
Tout supprimer...
Importer...
Exporter...
Afficher : Affic

	Plaque	n	S [m <sup>2</sup> ]	E [kPa]	ν	e [m]	z <sub>base</sub> [m]
N°1 - Polygone		23	225,00	1,00E07	0,15	0,80	0,00

Modification de l'entité
✕

Plaque ▼

Module de Young (kPa)

Coef. de Poisson (sans unité)

Épaisseur (m)

Cote de base (m)

Polygone ▼

X [m]	Y [m]
-10	0
-9,877	0,5
-9,511	1
-8,91	1,5
-8,09	2
-7,071	2,5
-5,878	3
-4,54	3,5
-3,09	4

Q  
[kN/m]

500,00

+  -  ↻

# Exercice 03

- Définition du radier et charges supportées

Assistant d'importation depuis le presse-papiers

Contenu du presse-papiers

Colonne 1	Colonne 2
-10	0
-9,877	0,5
-9,511	1
-8,91	1,5
-8,09	2
-7,071	2,5
-5,878	3
-4,54	3,5
-3,09	4
-1,564	4,5
0	5
1,564	5,5
3,09	6
4,54	6,5
5,878	7
7,071	7,5
8,09	8
8,91	8,5
9,511	9
0,877	9,5

X [m]      Y [m]

Options

Seules les cases écrites en noir seront importées.

Première ligne à importer: Ligne 1      Dernière ligne à importer: Ligne 23

Nombre de lignes à importer dans la table : 23      Nombre de colonnes à importer dans la table : 2      Nombre de lignes à créer dans la table : 23

Importer      Annuler