

Programme FoXta

Partie I : Module TASPOUTRE

TABLE DES MATIERES

I.1. ASPECT THEORIQUE	3
I.1.1. PRINCIPES DE CALCUL	3
I.1.2. FORMULATION	5
I.1.2.1. Cas général (pas d'éléments décollés)	5
I.1.2.2. Cas d'éléments décollés	7
I.1.2.3. Charges et réactions d'appui aux nœuds	8
I.1.3. APPLICATIONS ET LIMITES D'UTILISATION	9
I.2. MANUEL D'UTILISATION	10
I.2.1. ONGLET 1 : PARAMETRES GENERAUX	10
I.2.2. ONGLET 2 : CARACTERISTIQUES DES COUCHES DE SOL	11
I.2.3. ONGLET 3 : CHARGES SUR LE SOL	12
I.2.3.1. Onglet 3 : Charges sur le sol – Chargements cylindriques	14
I.2.3.2. Onglet 3 : Charges sur le sol – Chargements annulaires	16
I.2.3.3. Onglet 3 : Charges sur le sol – Chargements type Talus	17
I.2.4. ONGLET 4 : DEFINITION DE LA POUTRE	18
I.2.5. ONGLET 5 : CHARGEMENT AUX NŒUDS	19
I.2.6. ONGLET 6 : DECOLLEMENT DES NŒUDS	21
I.2.7. ONGLET 7 : CHARGEMENT SUR LES SEGMENTS ET CALCUL	21
I.2.7.1. Résultats	23
I.2.7.2. Fichier de résultats	24
I.2.7.3. Graphiques des résultats	25
I.3. EXEMPLES DE CALCUL TASPOUTRE	26
I.3.1. EXEMPLE 1	26
I.3.1.1. Présentation du problème	26
I.3.1.2. Saisie des données	27
I.3.2. EXEMPLE 2	39
I.3.2.1. Présentation du problème	39
I.3.2.2. Saisie des données	41
I.3.3. EXEMPLE 3	44
I.3.3.1. Présentation du problème	44
I.3.3.2. Constitution du fichier TASPIC	45
I.3.3.3. Constitution du fichier TASPOUTRE	47
I.3.3.4. Constitution du fichier TASSELDO	48
I.3.3.5. Résultats des itérations	49
I.4 CONSTITUTION DU FICHIER TASPOUTRE	51

Programme FoXta

Partie I : Module TASPOUTRE

I.1. ASPECT THEORIQUE

Le programme TASPOUTRE permet de calculer les déplacements et sollicitations d'une poutre d'inertie variable chargée verticalement, placée à la surface d'un massif à couches horizontales élastiques. L'influence de charges réparties éventuellement appliquées directement au massif en dehors de l'emprise de la poutre peut également être prise en compte.

Les chargements appliqués à la poutre peuvent consister en :

- Forces verticales et moments appliqués aux nœuds ;
- Charges verticales réparties (trapézoïdales) appliquées aux segments.

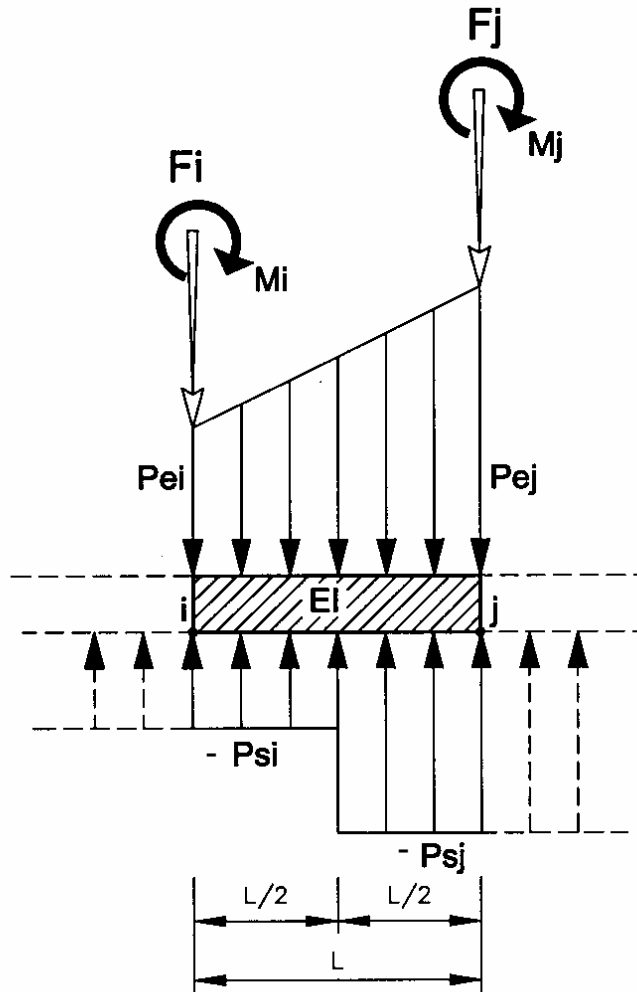
Les charges extérieures appliquées directement au massif sont définies par des surfaces rectangulaires uniformément chargées.

I.1.1. Principes de calcul

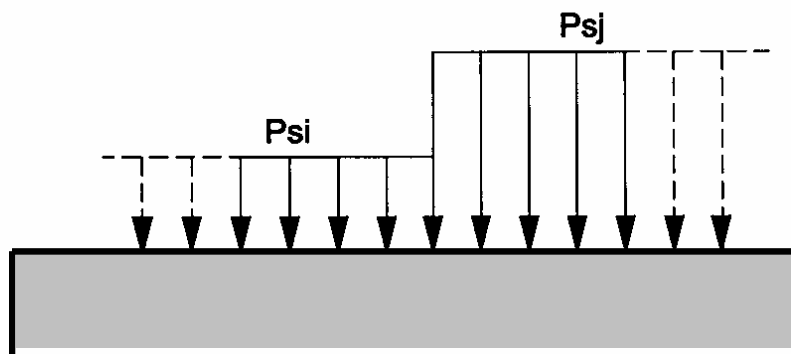
Le programme recherche la compatibilité entre :

- Les déformations de la poutre soumise à l'action du chargement sur sa face supérieure et des réactions du massif appliquées sur sa face inférieure ;
- Les déformations du massif multicouches sous l'influence des réactions qui lui sont transmises par la poutre d'une part, de celle des charges appliquées directement à la surface du massif d'autre part.

Les déplacements de la poutre sont exprimés selon la formulation des éléments finis (Fig. I.1.). La poutre est découpée en $(n-1)$ éléments (longueur L_i , produit d'inertie EI_i) en adoptant les déplacements et rotations comme inconnues aux nœuds ($2n$ variables notées respectivement δ_i et ω_i). Les fonctions d'interpolation sont des cubiques.



a) Efforts exercés sur un élément de la poutre



b) Réactions exercées sur le massif par l'élément considéré

Figure I. 1 : Principes de résolution adoptés au droit de chaque élément

1.1.2. Formulation

1.1.2.1. Cas général (pas d'éléments décollés)

Pour tous les nœuds le déplacement \mathbf{a} de la poutre est égal au tassement \mathbf{a}_s du massif.

La matrice de rigidité de la poutre \mathbf{K} est construite à partir des matrices élémentaires pour chaque élément.

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{L^4} \begin{bmatrix} 12L & 6L^2 & -12L & 6L^2 \\ 6L^2 & 4L^3 & -6L^2 & 2L^3 \\ -12L & -6L^2 & 12L & -6L^2 \\ 6L^2 & 2L^3 & -6L^2 & 4L^3 \end{bmatrix}$$

Le système d'équations à considérer pour la poutre est ainsi de la forme :

$$\mathbf{K}\mathbf{a} = \mathbf{f}_e + \mathbf{q} \quad (1)$$

\mathbf{K} : matrice de rigidité de la poutre (dimension $2n \times 2n$)

\mathbf{a} : vecteur des déplacements nodaux δ_i et ω_i de la poutre ($2n$)

\mathbf{f}_e : vecteur des forces nodales représentant les efforts et moments appliqués aux nœuds ($2n$)

\mathbf{q} : vecteur des forces nodales équivalentes aux pressions réparties sur chaque élément de poutre ($2n$)

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_e + \mathbf{q}_s \quad (2)$$

\mathbf{q}_e : vecteur des forces nodales représentant la distribution trapézoïdale du chargement extérieur \mathbf{p}_e ($2n$)

\mathbf{q}_s : vecteur des forces nodales représentant les réactions du massif $-\mathbf{p}_s$ sous chaque élément de poutre ($2n$).

Les réactions du sol sont supposées constantes et uniformes sur les moitiés des éléments contigus en chaque nœud.

Les vecteurs \mathbf{q}_e et \mathbf{q}_s sont construits par sommation des vecteurs élémentaires pour chaque élément :

$$\mathbf{q}_e = \mathbf{F}_e \mathbf{p}_e \quad (3)$$

et

$$\mathbf{q}_s = \mathbf{F}_s (-\mathbf{p}_s) \quad (4)$$

\mathbf{p}_e : vecteur des pressions extérieures imposées aux extrémités de l'élément considéré

$$\mathbf{p}_e = [\mathbf{p}_{ei} , \mathbf{p}_{ej}]^t$$

$-\mathbf{p}_s$: vecteur des réactions du massif sous chacune des deux extrémités de l'élément de poutre (2n).

$$-\mathbf{p}_s = [-\mathbf{p}_{si} , -\mathbf{p}_{sj}]^t$$

Les expressions des coefficients des matrices \mathbf{F}_e et \mathbf{F}_s ne sont pas identiques du fait des hypothèses adoptées :

- Variation linéaire des pressions extérieures sur la longueur de l'élément et travail des sollicitations de flexion pris en compte.
- Réaction de sol constante sous chaque demi-élément et travail des sollicitations de flexion négligé.

Avec les notations de la figure I.1. :

$$\mathbf{F}_e = \begin{bmatrix} \frac{7L}{20} & \frac{3L}{20} \\ \frac{L^2}{20} & \frac{L^2}{30} \\ \frac{20}{3L} & \frac{30}{7L} \\ \frac{20}{30} & \frac{20}{20} \\ -\frac{L^2}{30} & -\frac{L^2}{20} \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_s = \begin{bmatrix} \frac{13L}{32} & \frac{3L}{32} \\ \frac{11L^2}{192} & \frac{5L^2}{192} \\ \frac{192}{3L} & \frac{192}{13L} \\ \frac{32}{32} & \frac{32}{32} \\ -\frac{5L^2}{192} & -\frac{11L^2}{192} \end{bmatrix}$$

Les tassements du massif sont calculés par application de la solution approchée de Steinbrenner pour des massifs élastiques constitués de couches horizontales¹. Cette approche est également celle mise en œuvre dans le programme TASSELDO pour le calcul du tassement tridimensionnel élastique t_{3d} .

$$\mathbf{a}_s = \mathbf{T}_{inf} \mathbf{p}_s + \mathbf{a}_{ext} \quad (5)$$

\mathbf{a}_s : vecteur des tassements (composantes δ_i) du massif au droit de chacun des nœuds de la poutre demeurés en contact avec le sol (n).

\mathbf{T}_{inf} : matrice des coefficients d'influence des surfaces représentant les réactions uniformes de la poutre sur le massif (n x n).

\mathbf{p}_s : vecteur des réactions de la poutre sur le massif au droit des nœuds demeurés en contact avec la sol (n). Selon le principe de l'action et de la réaction, ces réactions sont égales et opposées à celles exercées par le massif sur la poutre.

\mathbf{a}_{ext} : vecteur des tassements induits au droit de chacun des nœuds par les charges extérieures à la poutre (n).

¹ Terzaghi, Theoretical soil mechanics, 2nd edition , 1943, pp.423-427

Pour un découpage déterminé de la poutre, les coefficients de la matrice \mathbf{T}_{inf} sont obtenus en appliquant une pression unité sur chacun des rectangles où la réaction du massif est supposée constante et en examinant le tassement résultant en chacun des nœuds de la poutre.

Le vecteur \mathbf{a}_{ext} est calculé pour l'ensemble des charges extérieures qui sont définies.

L'inversion de l'équation (5) conduit à :

$$\mathbf{p}_s = \mathbf{T}_{\text{inf}}^{-1} (\mathbf{a}_s - \mathbf{a}_{\text{ext}}) \quad (6)$$

Par réarrangement des différentes équations, on obtient le système linéaire d'équations suivant relatif aux déplacements nodaux (en observant que $\mathbf{a}_s = \mathbf{a}$) :

$$(\mathbf{K} + \mathbf{F}_s \mathbf{T}_{\text{inf}}^{-1}) \mathbf{a} = \mathbf{f}_e + \mathbf{F}_e \mathbf{p}_e + \mathbf{F}_s \mathbf{T}_{\text{inf}}^{-1} \mathbf{a}_{\text{ext}} \quad (7)$$

Son inversion fournit les valeurs des flèches δ_i et rotations ω_i aux différents nœuds :

$$\mathbf{a} = (\mathbf{K} + \mathbf{F}_s \mathbf{T}_{\text{inf}}^{-1})^{-1} (\mathbf{f}_e + \mathbf{F}_e \mathbf{p}_e + \mathbf{F}_s \mathbf{T}_{\text{inf}}^{-1} \mathbf{a}_{\text{ext}}) \quad (8)$$

La réaction de sol sous chacun des éléments se déduit des composantes δ_i du vecteur \mathbf{a} :

$$\mathbf{p}_s = - \mathbf{T}_{\text{inf}}^{-1} (\mathbf{a} - \mathbf{a}_{\text{ext}}) \quad (9)$$

1.1.2.2. Cas d'éléments décollés

Le sol ne pouvant développer de réactions de traction, l'obtention de réactions \mathbf{p}_s négatives nécessite de considérer que les éléments correspondants doivent être traités comme décollés. Ce choix est contrôlé par l'utilisateur.

Pour les éléments déclarés décollés :

- le tassement du massif \mathbf{a}_s n'est plus égal au déplacement de la poutre \mathbf{a} aux nœuds de l'élément considéré;
- la réaction du sol \mathbf{p}_{si} au droit du nœud considéré est nulle.

Les équations (4) et (5) sont donc retraitées en conséquence.

La résolution de l'équation (7) établit la valeur des déplacements \mathbf{a} en chacun des nœuds de la poutre.

Au droit des nœuds non décollés l'équation (9) est toujours applicable pour déterminer la valeur des réactions exercées sur le massif.

Au droit des nœuds décollés ($\mathbf{p}_{si} = 0$), le tassement du massif est obtenu par l'équation (5).

L'hypothèse de décollement du nœud est validée si on vérifie a posteriori que le tassement du massif est supérieur à celui calculé pour la poutre : $\mathbf{a}_{si} > \mathbf{a}_i$.

Dans le cas contraire une nouvelle itération est nécessaire.

I.1.2.3. Charges et réactions d'appui aux nœuds

Le chargement extérieur appliqué aux nœuds est constitué par des forces verticales et des moments. Il est exprimé comme suit :

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{V}_{0i} - \mathbf{X}_v \delta_i \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{M}_{0i} - \mathbf{X}_m \omega_i \quad (11)$$

Les termes X_v et X_m caractérisent des appuis élastiques en translation et rotation. Ces valeurs sont nulles lorsque les efforts extérieurs (force ou moment) appliqués au nœud considéré sont indépendants du déplacement de la poutre.

Les termes X_v et X_m permettent de définir des conditions d'appui pour la poutre ; chaque nœud de la poutre peut ainsi être fixé en translation (X_v très grand : cas d'un appui simple) ou rotation (X_m très grand : cas d'un encastrement).

La prise en compte des raideurs élastiques d'appui amène à traiter les chargements nodaux sous la forme matricielle :

$$\mathbf{f}_e = \mathbf{f}_0 + \mathbf{X} \mathbf{a} \quad (13)$$

\mathbf{f}_e : vecteur des forces nodales représentant les efforts et moments totaux appliqués aux nœuds (2n)

\mathbf{f}_0 : vecteur des forces nodales indépendantes du déplacement (2n)

\mathbf{X} : matrice diagonale des raideurs élastiques en translation X_{vi} ou translation X_{mi} (2n)

\mathbf{a} : vecteur des déplacements nodaux δ_i et ω_i de la poutre (2n)

Le système des équations à résoudre devient alors le suivant :

$$(\mathbf{K} + \mathbf{F}_s \mathbf{T}_{inf}^{-1} - \mathbf{X}) \mathbf{a} = \mathbf{f}_0 + \mathbf{F}_e \mathbf{p}_e + \mathbf{F}_s \mathbf{T}_{inf}^{-1} \mathbf{a}_{ext} \quad (14)$$

Pour des appuis fixes en translation ou rotation, le choix des raideurs X_v et X_m incombe à l'utilisateur ; dans la pratique une valeur 10^{10} se révèle suffisante.

1.1.3. Applications et limites d'utilisation

La formulation introduite dans le programme permet de traiter le tassement et la déformée de poutres d'inertie variable, sous chargement ponctuel et/ou réparti.

Il est important de noter que le **produit d'inertie** des éléments et **les chargements ponctuels** (forces et moments) doivent être **définis par mètre linéaire de largeur** de la poutre.

TASPOUTRE permet également de prendre en compte le décollement de certains nœuds de la poutre et l'influence de charges sur le sol aux alentours de la poutre.

Par ailleurs, en combinant les résultats de ce programme avec des calculs issus du programme TASPIE, la modélisation de fondations mixtes devient possible (Voir I.3.3. Exemple 3).

La capacité des tableaux et des vecteurs prise en compte dans le programme impose les limites suivantes :

- Nombre de couches de terrain ≤ 50
- Nombre de surfaces chargées extérieures à la poutre + Nombre d'éléments composants la poutre ≤ 250
- Nombre de nœuds avec des conditions de chargement (forces et moments) ≤ 250
- Nombre de segments soumis à une pression trapézoïdale ≤ 250

Les tailles des tableaux sont gérées de manière dynamique afin de réduire la mémoire réellement utilisée durant les calculs

La flexion de la poutre prise en compte dans ce programme est uniquement bidimensionnelle et s'applique donc de préférence à des structures dont la largeur est soit très grande par rapport à la longueur (ex : radier d'écluse), soit très petite par rapport à la longueur (ex : poutre).

Le tassement du sol est estimé à partir de la méthode Steinbrenner, ce qui introduit une précision limitée. Une étude comparative a été menée entre les résultats issus du logiciel TASPOUTRE et ceux provenant du programme de calcul éléments finis PLAXIS. Il apparaît que TASPOUTRE sous estime les tassements et que la différence est de l'ordre de 10%, ce qui reste correct.

Enfin, il est conseillé de discrétiser plus finement les extrémités de la poutre afin d'éviter l'apparition d'"effets de bord" parasites.

I.2. MANUEL D'UTILISATION

On présente dans ce chapitre les paramètres nécessaires à l'exécution du calcul TASPOUTRE. Certaines zones ne peuvent recevoir que des données ayant une signification physique (Exemple : Module d'Young $E > 0$).

La fenêtre du module TASPOUTRE est constituée de 7 onglets dont 6 sont toujours visibles. Le septième onglet apparaît lorsque la case "Décollement des nœuds" est cochée. Pour changer d'onglet, cliquer simplement sur l'onglet choisi ou utiliser les boutons [Précédent] et [Suivant]. Toutes les fonctionnalités décrites dans la partie C s'appliquent à ce module.

I.2.1. Onglet 1 : Paramètres généraux

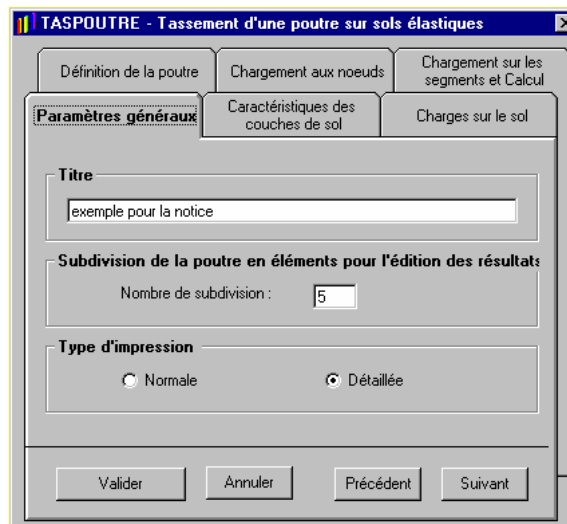


Figure I. 2 : Module TASPOUTRE – Paramètres généraux.

Ce premier onglet comporte les informations suivantes :

- Le Titre spécifique au module qui ne peut comporter que 80 caractères;
- Le nombre de subdivisions N : la poutre est décrite en termes d'éléments et lors de l'édition des résultats, chaque demi-élément est subdivisé en N parties
- Le détail des résultats : impression Normale ou Détaillée

1.2.2. Onglet 2 : Caractéristiques des couches de sol

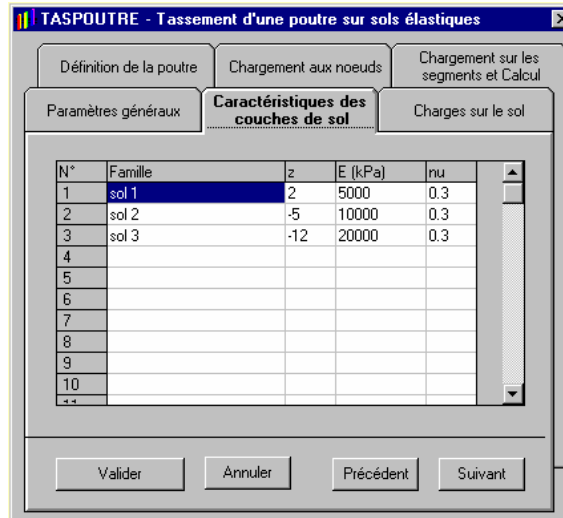


Figure I. 3 : Module TASPOUTRE – Caractéristiques des couches de sol

Ce second onglet nécessite l'introduction des paramètres relatifs au comportement du sol. L'utilisation de la base générale de données permet une introduction rapide des données.

Procéder de la manière suivante :

- Double-cliquer sur la première cellule (Nom de la couche - Ligne 1). La fenêtre suivante apparaît :

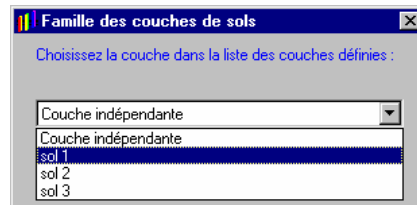


Figure I. 4 : Module TASPOUTRE - Famille des couches de sol de la base générale de données

- Choisir dans la liste des familles celle qui vous convient; (La couche appelée "Couche Indépendante" permet de s'affranchir des données de la base générale et de définir une couche dont les paramètres seront introduits manuellement par l'utilisateur);
- Cliquer sur le bouton [Valider];

De manière automatique, les paramètres géotechniques de cette couche sont copiés dans le tableau des caractéristiques des couches de sol sur la première ligne.

- Recommencer avec les lignes suivantes si nécessaire (50 couches maximum).

Il reste alors à introduire, pour chaque couche, la cote Z , qui correspond à la cote de la base de la couche.

Les paramètres géotechniques nécessaires au calcul sont :

- Z :** Cote de la base de la couche considérée;
E : Module d'Young de la couche considérée;
v : Coefficient de Poisson de la couche considérée;

1.2.3. Onglet 3 : Charges sur le sol

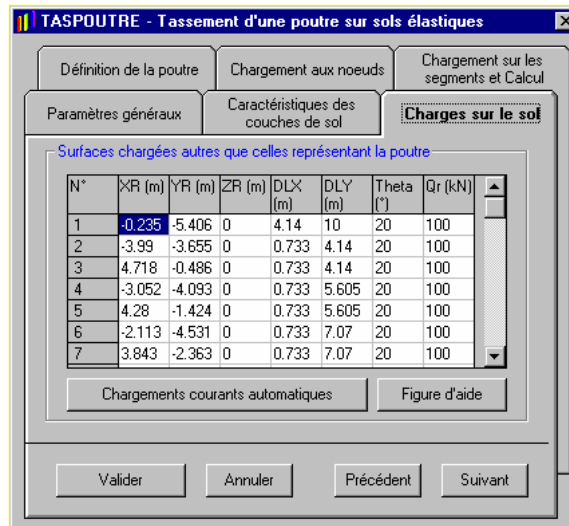


Figure I. 5 : Module TASPOUTRE – Charges sur le sol

Cet onglet permet de définir des chargements éventuels extérieurs à la poutre, appliqués directement au sol, afin de prendre en compte leur influence sur son tassement. Ces charges peuvent ne pas exister, auquel cas le tableau demeure vide.

Les chargements pris en compte dans le module TASPOUTRE sont obligatoirement rectangulaires. Toutefois, il est possible de définir des chargements de forme complexe en combinant des rectangles de dimensions quelconques.

De la même manière que dans le module TASSELDO, cet onglet dispose d'un bouton [Chargements courants automatiques], qui facilite la définition de chargements « courants ». Ce bouton permet de définir simplement :

- des chargements cylindriques ;
- des chargements annulaires ;
- des chargements type Talus ;
- des chargement triangulaires (en développement au moment de la rédaction de la notice).

Les données (obligatoires) pour chaque rectangle à introduire dans le tableau de l'onglet 3 sont les suivantes :

- X_0, Y_0, Z_0 : Coordonnées du coin de référence du rectangle (l'axe Z est dirigé vers le bas, Z quelconque).
- L_x, L_y : dimensions suivant X et Y du rectangle ($L_x, L_y > 0$).
- Θ : angle que fait le côté de longueur L_x avec l'axe Ox exprimé en degré (positif dans le sens trigonométrique).
- q : densité de charge uniforme sur le rectangle considéré ($q > 0$).

Pour accéder à la fenêtre "Chargements courants automatiques", cliquer sur le bouton correspondant. La Figure I. 6 : illustre les différents choix possibles. Choisir le type de chargement et cliquer sur le bouton [Valider]. La description du fonctionnement des fenêtres des différents chargements est explicitée dans les chapitres I.2.3.1. à I.2.3.3.

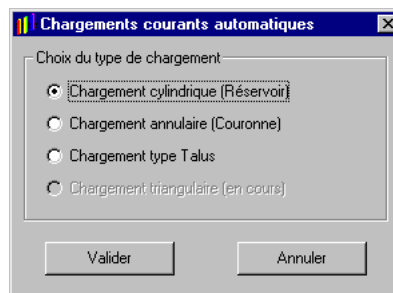


Figure I. 6 : Module TASPOUTRE – Chargements courants automatiques.

Un bouton [Figure d'aide] permet d'accéder à une aide visuelle correspondant aux données à introduire dans le tableau des charges sur le sol (Voir Figure I. 7)

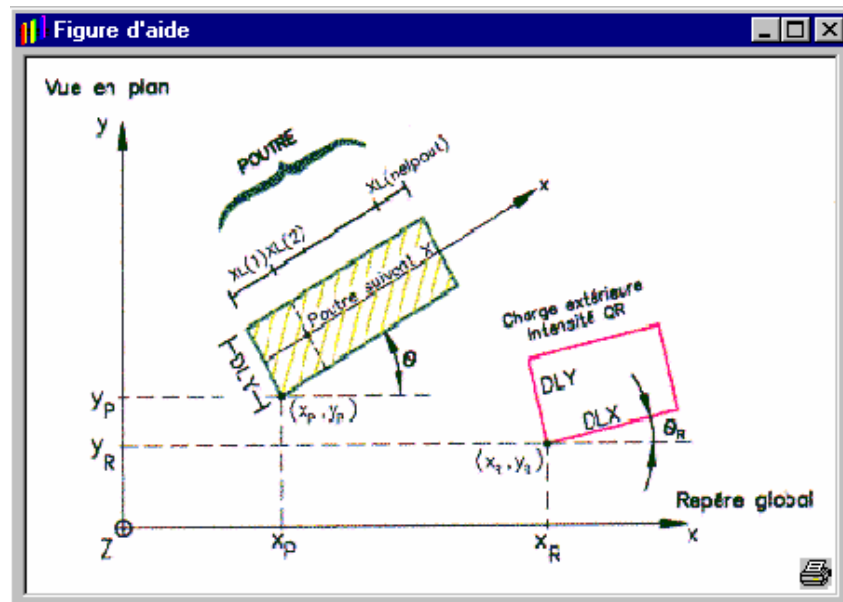


Figure I. 7 : Module TASPOUTRE – Figure d'aide pour l'onglet Charges sur le sol

I.2.3.1. Onglet 3 : Charges sur le sol – Chargements cylindriques

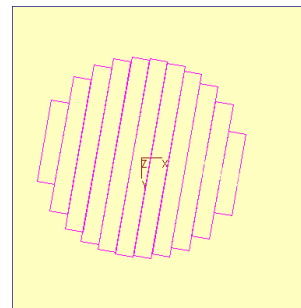
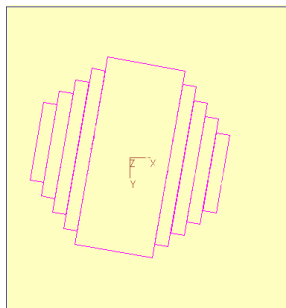
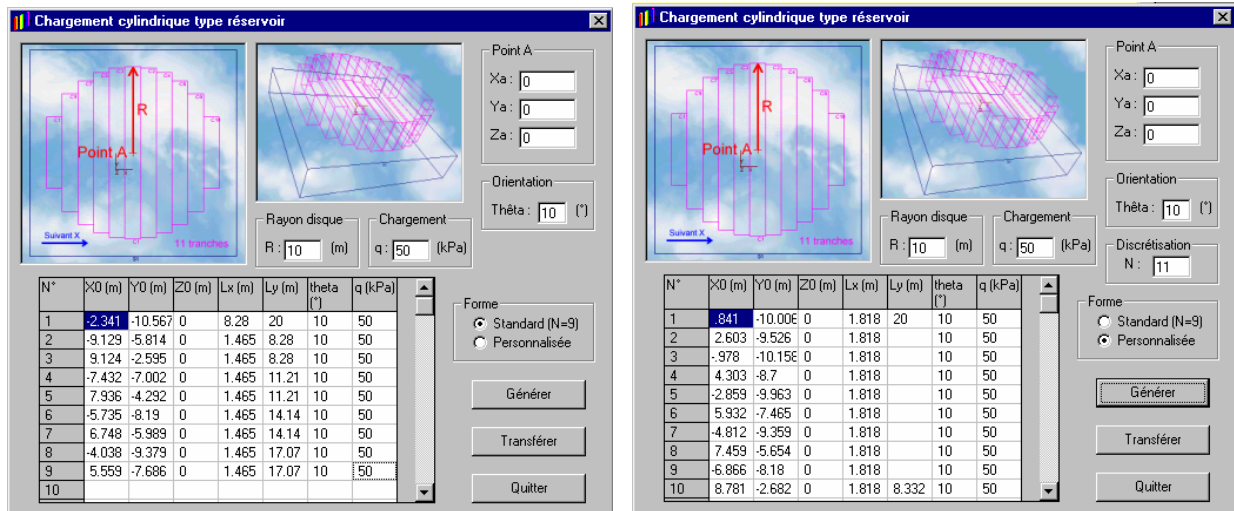
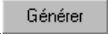



Figure I. 8 : Module TASPOUTRE – Chargement cylindrique type réservoir.

Cette fenêtre de définition automatique de chargement permet de calculer la position, l'orientation et l'amplitude des rectangles de chargements pour des chargements cylindriques tels que les réservoirs par exemple.

Les données à introduire sont :

- Les coordonnées du centre du cylindre A (X_A, Y_A, Z_A);
- Le rayon R du disque;
- La valeur q du chargement uniforme sur l'ensemble du cylindre;
- L'orientation θ du repère local (O_x, O_y) du cylindre dans le repère global (O_X, O_Y);
- La sélection d'une forme pour le cylindre : Symétrique par rapport à A ou Personnalisée auquel cas il sera nécessaire de définir également la discrétisation N du cylindre (Voir les figures correspondantes ci-dessus).

Le calcul des données X_0, Y_0, Z_0, L_x, L_y , θ et q , définissant chacun des rectangles représentant le chargement cylindrique, est activé par un clic sur le bouton . Le transfert des valeurs calculées vers le module TASPOUTRE peut se faire de deux manières :

- Par un copier-coller d'une sélection FoXta du tableau ci-dessus vers le tableau de l'Onglet "Charges sur le sol" dans TASPOUTRE ;
- Par l'utilisation du bouton  qui recopie l'ensemble du contenu du tableau vers le tableau de TASPOUTRE. Les données sont tronquées si la place disponible n'est pas suffisante.

I.2.3.2. Onglet 3 : Charges sur le sol – Chargements annulaires

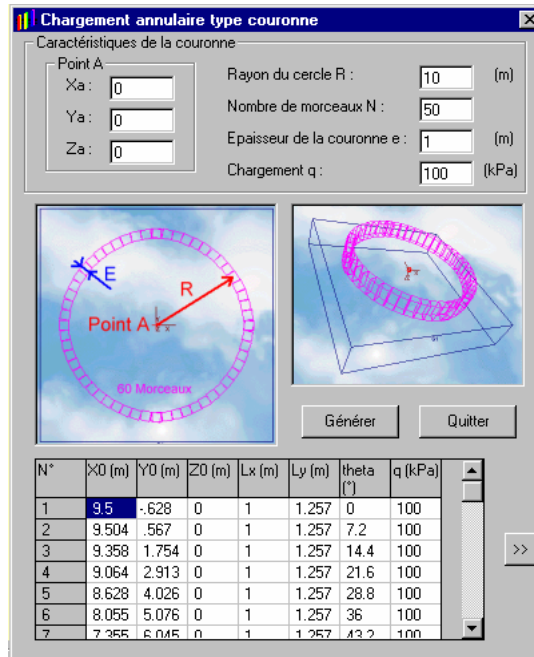


Figure I. 9 : Module TASPOUTRE – Chargement annulaire type couronne.

Cette fenêtre de définition automatique de chargements permet de calculer la position, l'orientation et l'amplitude des rectangles de chargement pour les chargements annulaires.

Les données à introduire sont :

- Les coordonnées du centre de la couronne A (X_A, Y_A, Z_A);
- Le rayon R de la fibre moyenne de la couronne;
- Le nombre de morceaux N définissant la couronne;
- L'épaisseur e de la couronne;
- La valeur q du chargement;

Le calcul des données $X_0, Y_0, Z_0, L_x, L_y, \theta$ et q, définissant chacun des rectangles représentant le chargement annulaire, est activé par un clic sur le bouton **Générer**. Le transfert des valeurs calculées vers le module TASPOUTRE peut se faire de deux manières :

- Par un copier-coller d'une sélection FoXta du tableau ci-dessus vers le tableau de l'Onglet "Charges sur le sol" dans TASPOUTRE ;
- Par l'utilisation du bouton **>>** qui recopie l'ensemble du contenu du tableau vers le tableau de TASPOUTRE. Les données sont tronquées si la place disponible n'est pas suffisante.

I.2.3.3. Onglet 3 : Charges sur le sol – Chargements type Talus

N°	X0 (m)	Y0 (m)	Z0 (m)	Lx (m)	Ly (m)	theta (°)	q (kPa)
1	0	0	0	1	10	0	50
2	1	0	0	1	10	0	
3	2	0	0	1	10	0	
4	3	0	0	1	10	0	
5	4	0	0	1	10	0	

Figure I. 10 : Module TASPOUTRE – Chargement pyramidal type talus.

Cette fenêtre de définition automatique de chargements permet de calculer la position, l'orientation et l'amplitude des rectangles de chargement pour les chargements pyramidaux.

Les données à introduire sont :

- Les coordonnées du point de référence A (X_A, Y_A, Z_A);
- Les largeurs l et l_t ainsi que la longueur L du talus. Ces paramètres sont illustrés sur la figure D.12.
- Les valeurs de chargements q_1 à q_4 situés respectivement au point A pour q_1 , en l pour q_2 et q_3 et en l_t pour q_4 .
- La direction de l'axe principal du chargement (X ou Y).

Le calcul des données $X_0, Y_0, Z_0, L_x, L_y, \theta$ et q , définissant chacun des rectangles représentant le chargement type talus, est activé par un clic sur le bouton **Générer**. Le transfert des valeurs calculées vers le module TASPOUTRE peut se faire de deux manières :

- Par un copier-coller d'une sélection FoXta du tableau ci-dessus vers le tableau de l'Onglet "Charges sur le sol" dans TASPOUTRE;
- Par l'utilisation du bouton **>>** qui recopie l'ensemble du contenu du tableau vers le tableau de TASPOUTRE. Les données sont tronquées si la place disponible n'est pas suffisante.

1.2.4. Onglet 4 : Définition de la poutre

Définition du repère d'axe de la poutre

XP : 5 (m) YP : 0 (m) ZP : 5 (m)
 Thêta : 20 (°) DLY : 1 (m) [Figure d'aide](#)

Longueurs (dans le repère local de la poutre) et Produits d'Inert

N°	1	2	3	4
XL (m)	3	4	3	4
EI (kN.m²/m)	20000	83300	20000	20000
Nx	3	8	3	3

Buttons: Valider, Annuler, Précédent, Suivant

Figure I. 11 : Module TASPOUTRE – Définition de la poutre

Cet onglet permet de définir la géométrie, la situation et la discrétisation de la poutre.

Dans la partie supérieure "Définition du repère d'axe de la poutre", les données à introduire sont :

- Xp, Yp, Zp :** Les coordonnées d'un coin de la poutre ;
Thêta : L'orientation de la poutre dans le plan (Oxy) ;
DLY : La largeur de la poutre;

Un bouton [Figure d'aide] permet d'accéder à une aide visuelle correspondant aux données à introduire dans le tableau des charges sur le sol (Voir Figure I. 7)

Dans le tableau de la partie inférieure, chaque colonne correspond à un tronçon comportant des éléments identiques (même dimension et même module d'inertie). Pour chaque tronçon, les informations à donner concernent :

- XL :** La longueur du tronçon concerné;
EI : Le module d'inertie **par mètre linéaire de largeur** du tronçon;
Nx : Le nombre d'éléments à générer dans le tronçon concerné

1.2.5. Onglet 5 : Chargement aux nœuds

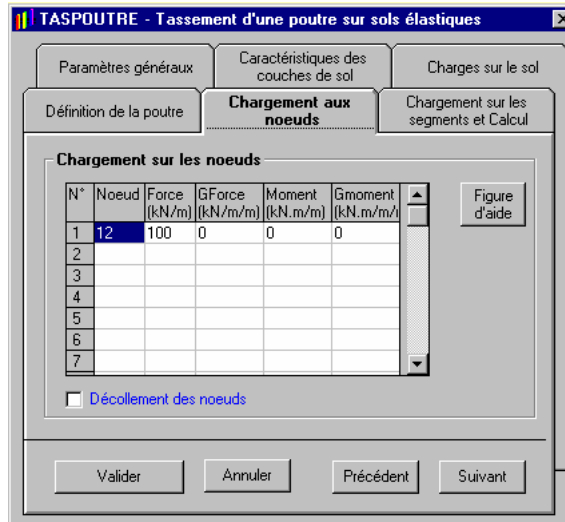


Figure I. 12 : Module TASPOUTRE – Chargement aux nœuds

Le tableau proposé dans cet onglet permet de définir les conditions de chargement ponctuelle de la poutre au niveau des nœuds.

Les informations de cet onglet sont facultatives pour le calcul. Si aucun nœud n'est chargé, le tableau reste vide.

Pour chaque nœud chargé, les données à saisir sont :

- Nœud :** Le numéro du nœud sur lequel est appliqué le chargement ;
- Force :** L'effort vertical appliqué **par mètre linéaire de largeur** de la poutre ;
- GForce :** La raideur verticale au droit du nœud ;
- Moment :** Le moment de flexion appliqué **par mètre linéaire de largeur** de la poutre ;
- Gmoment :** La raideur de flexion au droit du nœud ;

A noter : Pour le nœud $n^{\circ}i$, l'effort appliqué à la poutre s'écrit :

$$X = \text{Force} - \text{GForce} \cdot y \quad \text{avec } y \text{ le déplacement du nœud } n^{\circ}i$$

Pour le nœud $n^{\circ}i$, le moment appliqué à la poutre s'écrit :

$$M = \text{Moment} - \text{Gmoment} \cdot y' \quad \text{avec } y' \text{ la rotation du nœud } n^{\circ}i$$

Un bouton [Figure d'aide] permet de faire apparaître une figure rappelant les conventions de signes des efforts et des déplacements adoptées dans ce programme (Voir Figure I. 13).

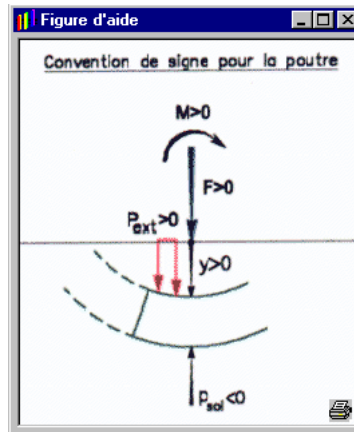


Figure I. 13 : Module TASPOUTRE – Figure d'aide concernant les conventions de signes

La case à cocher ([Décollement des nœuds](#)), permet de faire apparaître l'onglet "Décollement des nœuds"

1.2.6. Onglet 6 : Décollement des nœuds



Figure I. 14 : Module TASPOUTRE – Décollement des nœuds

Dans cet onglet, il s'agit de saisir, l'un à la suite de l'autre, les numéros des nœuds (dans l'ordre) pour lesquels on impose un décollement, c'est-à-dire une pression du sol nulle.

1.2.7. Onglet 7 : Chargement sur les segments et Calcul

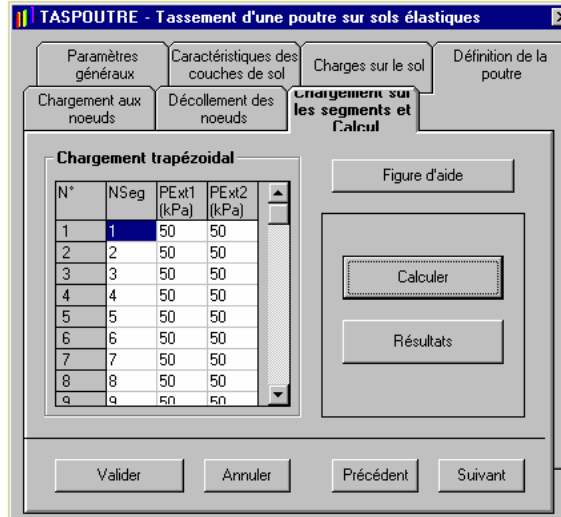


Figure I. 15 : Module TASPOUTRE – Chargement sur les segments et Calcul

Cet onglet a pour fonction d'enregistrer les chargements surfaciques au niveau des segments concernés.

Dans le tableau intitulé "Chargement trapézoïdal", les informations suivantes doivent être renseignées :

- NSeg :** Le numéro du segment sur lequel est appliqué le chargement ;
PExt1, PExt2 : Les valeurs de la pression imposée aux deux extrémités du segment concerné ;

Comme dans le cas du chargement ponctuel (onglet 5 : Chargement aux nœuds), la saisie d'une pression répartie est facultative. Si aucun élément ne reçoit une pression répartie, ce tableau reste vide.

Le bouton [Figure d'aide] donne accès à la visualisation d'un schéma rappelant les conventions de signes adoptées, en ce qui concerne les efforts sur la poutre.

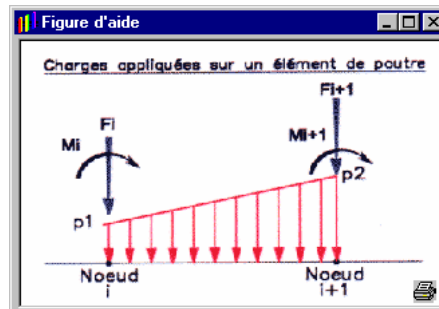
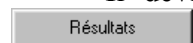


Figure I. 16 : Module TASPOUTRE – Figure d'aide concernant les conventions de signes pour les efforts appliqués à la poutre

Le bouton exécute la procédure de calcul du module TASPOUTRE. Une fenêtre particulière indique que les calculs sont en cours. Elle informe également sur la présence et la validité de la clé électronique nécessaire à l'utilisation du module TASPOUTRE. La fenêtre se ferme automatiquement dès que le calcul est terminé.

Il devient alors possible d'exploiter les résultats des calculs à l'aide du bouton



I.2.7.1. Résultats

L'utilisation de la fenêtre des Résultats est décrite en détail dans la Partie C - Tour d'horizon des fonctionnalités. Pour TASPOUTRE, les trois onglets se réfèrent aux données suivantes :

- Onglet 1 : Le tableau contenant les abscisses X le long de la poutre avec les efforts et les déplacements de la poutre correspondants (Figure I. 17).
- Onglet 2 : L'éditeur de texte contenant une synthèse des données de calcul et des résultats (Figure I. 18).
- Onglet 3 : Les graphiques représentant les résultats (Figure I. 19).

Poutre	Abscisse (m)	Flèche - Déplacement vertical (m)	Moment fléchissant (kN.m)	Effort Tranchant (kN)	Pression extérieure du sol (kPa)	Pression imposée sur la poutre (kPa)	Déformée du sol (m)
1	0.0000E+00	0.59810E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.50000E+02	-26.294	0.59810E-01
1	0.10000E+00	0.59287E-01	-0.11853E+00	0.23706E+01	0.50000E+02	-26.294	0.59287E-01
1	0.20000E+00	0.58764E-01	-0.47412E+00	0.47412E+01	0.50000E+02	-26.294	0.58764E-01
1	0.30000E+00	0.58241E-01	-0.10668E+01	0.71117E+01	0.50000E+02	-26.294	0.58241E-01
1	0.40000E+00	0.57719E-01	-0.18965E+01	0.94823E+01	0.50000E+02	-26.294	0.57719E-01
1	0.50000E+00	0.57198E-01	-0.29632E+01	0.11853E+02	0.50000E+02	-26.294	0.57198E-01
1	0.50000E+00	0.57198E-01	-0.29632E+01	0.11853E+02	0.50000E+02	66.277	0.57198E-01
1	0.60000E+00	0.56679E-01	-0.40671E+01	0.10225E+02	0.50000E+02	66.277	0.56679E-01
1	0.70000E+00	0.56162E-01	-0.50083E+01	0.85976E+01	0.50000E+02	66.277	0.56162E-01
1	0.80000E+00	0.55647E-01	-0.57866E+01	0.69699E+01	0.50000E+02	66.277	0.55647E-01
1	0.90000E+00	0.55135E-01	-0.64023E+01	0.53423E+01	0.50000E+02	66.277	0.55135E-01
1	0.10000E+01	0.54626E-01	-0.68551E+01	0.37146E+01	0.50000E+02	66.277	0.54626E-01
1	0.10000E+01	0.54626E-01	-0.68551E+01	0.37146E+01	0.50000E+02	66.277	0.54626E-01
1	0.11000E+01	0.54120E-01	-0.71452E+01	0.20870E+01	0.50000E+02	66.277	0.54120E-01
1	0.12000E+01	0.53619E-01	-0.72725E+01	0.45930E+00	0.50000E+02	66.277	0.53619E-01
1	0.13000E+01	0.53121E-01	-0.72370E+01	-0.11684E+01	0.50000E+02	66.277	0.53121E-01
1	0.14000E+01	0.52627E-01	-0.70388E+01	-0.27960E+01	0.50000E+02	66.277	0.52627E-01
1	0.15000E+01	0.52136E-01	-0.66778E+01	-0.44237E+01	0.50000E+02	66.277	0.52136E-01
1	0.15000E+01	0.52136E-01	-0.66778E+01	-0.44237E+01	0.50000E+02	63.601	0.52136E-01
1	0.16000E+01	0.51648E-01	-0.61675E+01	-0.57838E+01	0.50000E+02	63.601	0.51648E-01
1	0.17000E+01	0.51163E-01	-0.55211E+01	-0.71439E+01	0.50000E+02	63.601	0.51163E-01
1	0.18000E+01	0.50680E-01	-0.47387E+01	-0.85040E+01	0.50000E+02	63.601	0.50680E-01
1	0.19000E+01	0.50200E-01	-0.38203E+01	-0.98641E+01	0.50000E+02	63.601	0.50200E-01
1	0.20000E+01	0.49722E-01	-0.27659E+01	-1.1224E+02	0.50000E+02	63.601	0.49722E-01
1	0.20000E+01	0.49722E-01	-0.27659E+01	-1.1224E+02	0.50000E+02	63.601	0.49722E-01
1	0.21000E+01	0.49246E-01	-0.15754E+01	-0.12584E+02	0.50000E+02	63.601	0.49246E-01
1	0.22000E+01	0.48770E-01	-0.24898E+00	-0.13944E+02	0.50000E+02	63.601	0.48770E-01
1	0.23000E+01	0.48295E-01	0.12125E+01	-0.15285E+02	0.50000E+02	63.601	0.48295E-01

Figure I. 17 : Module TASPOUTRE – Résultats – Moments/Efforts/Pressions

```

exemple pour la notice

Caractéristiques des couches

n   base   module   coef. Poisson
1   2.000   0.500E+04   0.300
2   -5.000   0.100E+05   0.300
3  -12.000   0.200E+05   0.300

Décomposition de la poutre

n   l       ET
1   1.000   20000.000
2   1.000   20000.000
3   1.000   20000.000
4   0.500   83300.000
5   0.500   83300.000
6   0.500   83300.000
7   0.500   83300.000
8   0.500   83300.000
9   0.500   83300.000
10  0.500   83300.000
11  0.500   83300.000
12  1.000   20000.000
13  1.000   20000.000
14  1.000   20000.000

Surfaces de charges rectangulaires

```

Figure I. 18 : Module TASPOUTRE – Fichier de résultats

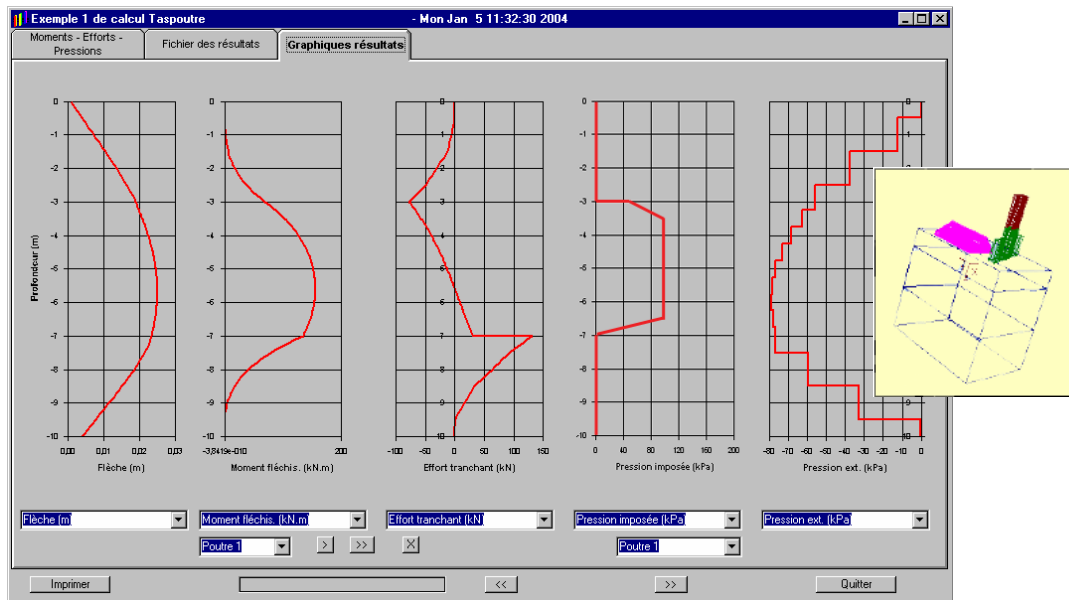


Figure I. 19 : Module TASPOUTRE - Graphiques des résultats

I.2.7.2. Fichier de résultats

Le fichier de résultats est constitué de deux parties. La première est consacrée au rappel des données du problème telles que les caractéristiques du sol, de la poutre et des chargements (chargements du sol et chargements de la poutre). Ainsi, la modélisation de la poutre en éléments et en nœuds est présentée plus en détails dans cette partie.

Il est à noter que dans ces tableaux les valeurs de z correspondent à des cotes et que les axes x et y sont les axes contenus dans le plan horizontal, appartenant à un repère de référence.

La seconde partie du fichier de résultats concerne l'énoncé des résultats proprement dits. Son contenu varie selon que l'utilisateur demande un fichier de résultats avec impression "normale" ou "détaillée".

Dans le dernier cas, un premier tableau présente la valeur des déplacements et des rotations des nœuds (qui correspondent aux points de calculs déterminés dans la première partie) et un second, la réaction du sol et les tassements sous les segments, au niveau de chaque nœud également. Dans ce dernier affichage, la colonne "statut" correspond à l'état de décollement du nœud concerné. Si "***" est inscrit, le nœud n'est pas déclaré comme décollé, alors que si "décollé" est écrit dans cette colonne, il l'est.

Il est important de faire ici la différence entre un nœud qui est déclaré décollé par l'utilisateur et un nœud pour lequel les résultats obtenus contiennent des aberrations (pression du sol positive ou tassement du sol inférieur à la flèche de la poutre). Dans le fichier de résultats, le premier cas sera noté "décollé" dans la colonne "statut", et le second pourra être relevé grâce à la mention "non valide" dans la colonne suivante.

Par ailleurs, quel que soit le type d'impression choisi (normale ou détaillée), à la suite, est présenté un tableau rassemblant la déformation verticale, la pression du sol, la pression extérieure, le moment, l'effort tranchant et la raideur. Ces valeurs sont déterminées non seulement en chaque nœud, mais aussi en chaque subdivision dont le nombre est déterminé

par l'utilisateur. La finesse de ce découpage ne joue aucun rôle sur la précision des calculs car il sert uniquement lors de l'impression des résultats.

Dans ce tableau, il n'apparaît pas la mention "non valide" dans le cas d'un décollement mis en évidence par le calcul. Aussi, lors d'une impression normale, cet affichage étant le seul qui présente les résultats, il convient de vérifier les valeurs de la pression du sol et de la déflexion Y.

Pour la seconde partie, les coordonnées en x représentent les abscisses le long de la poutre (repère local à la poutre) et les valeurs de f sont les déformations verticales de la poutre, égales aussi aux tassements du sol, sauf en cas de décollement.

1.2.7.3. Graphiques des résultats

L'utilisation de la fenêtre des graphiques des résultats est décrite en détail dans la Partie C - Tour d'Horizon des fonctionnalités. Pour TASPOUTRE, les choix d'affichage possibles sont au nombre de six maximum :

- La flèche de la poutre en fonction de l'abscisse x ;
- La déformée du sol en fonction de l'abscisse x ;
- Le moment fléchissant en fonction de l'abscisse x (pour 1ml de longueur) ;
- L'effort tranchant en fonction de l'abscisse x (pour 1 ml de longueur) ;
- La pression imposée en fonction de l'abscisse x ;
- La pression extérieure en fonction de l'abscisse x.

I.3. EXEMPLES DE CALCUL TASPOUTRE

I.3.1. Exemple 1

I.3.1.1. Présentation du problème

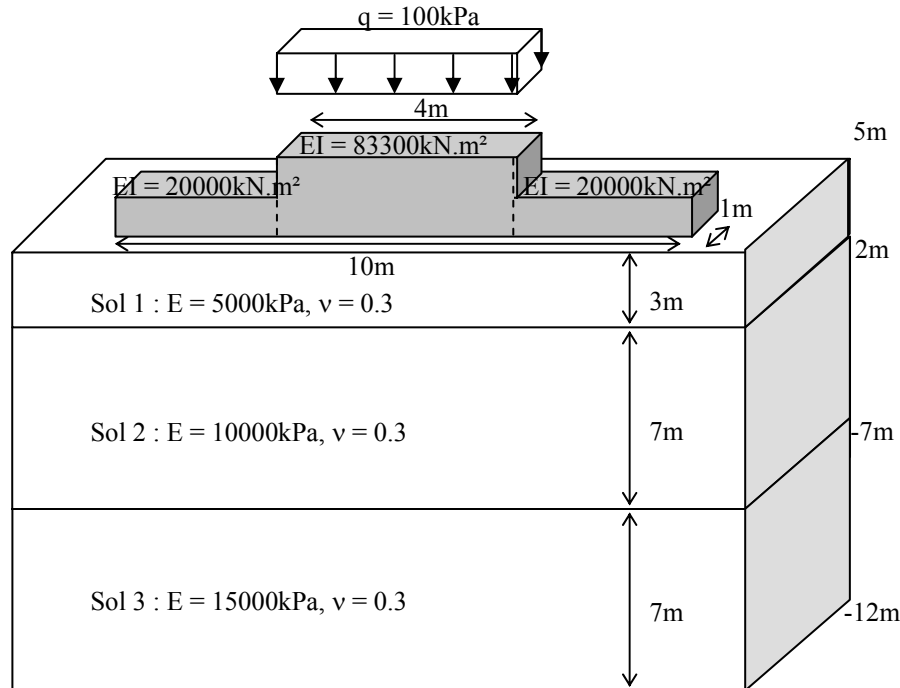


Figure I. 20 : Exemple 1

Cet exemple traite du tassement et de la flexion d'une poutre, d'inertie non uniforme. Dans un premier temps, on ne considère qu'un chargement réparti sur un tronçon central de la poutre.

Ensuite le cas d'une force concentrée ajoutée à la pression est examiné et une surcharge extérieure en forme de talus est également prise en compte.

Les données de sol sont présentées sur la Figure I. 20 ci-dessus et le tableau suivant propose la géométrie de la poutre.

		Tronçon 1	Tronçon 2	Tronçon 3
Poutre	Inclinaison (°)	20		
	Point origine	(5, 0, 5)		
	Module de rigidité EI (kN.m ²)	20000	83300	20000
	Longueur (m)	3	4	3
	Nombre de discrétisations	3	8	3
Chargement	Pression q(kPa)	0	100	0

TABLEAU I. 1 : Exemple 1 – Données numériques

Enfin pour la sortie des résultats, chaque intervalle est subdivisé en $N = 5$ morceaux.

I.3.1.2. Saisie des données

◆ Ouverture de FOXTA

1°) Entrer et valider les données concernant le projet dans la fenêtre "Titre – n° Affaire – Commentaires".

Figure I. 21 : Exemple 1 - Titre – n° Affaire – Commentaire

2°) La fenêtre "Base de données générales des caractéristiques des couches de sol" apparaît. Elle permet de conserver les caractéristiques des couches de sol susceptibles d'être utilisées dans différents modules. Pour cet exemple, dans la partie supérieure on coche l'option "Taspoutre", ce qui permet d'afficher uniquement les deux colonnes nécessaires. Ces deux colonnes sont complétées avec les valeurs présentées sur la Figure I. 20.

N°	Nom de la couche de sol	Module d'Young E (kPa)	Coefficient de Poisson nu
1	sol 1	5000	0.3
2	sol 2	10000	0.3
3	sol 3	20000	0.3
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			

Figure I. 22 : Exemple 1 - Base de données générales des caractéristiques des couches de sol

3°) Cliquer sur [Valider et Mettre à jour les données dans les modules de calculs actifs].

A présent, le plan de travail ne contient plus que la fenêtre de "Graphique Tridimensionnel".

◆ Nouveau module

4°) Créer un module TASPOUTRE dans ce nouveau projet en cliquant sur le menu "Modules", puis "Nouveau module". La fenêtre "Enregistrer sous" apparaît. Introduire un nom et un chemin de sauvegarde. Valider.

5°) La fenêtre "Choix du module de calcul" s'affiche. Cliquer alors sur l'image correspondant à TASPOUTRE.

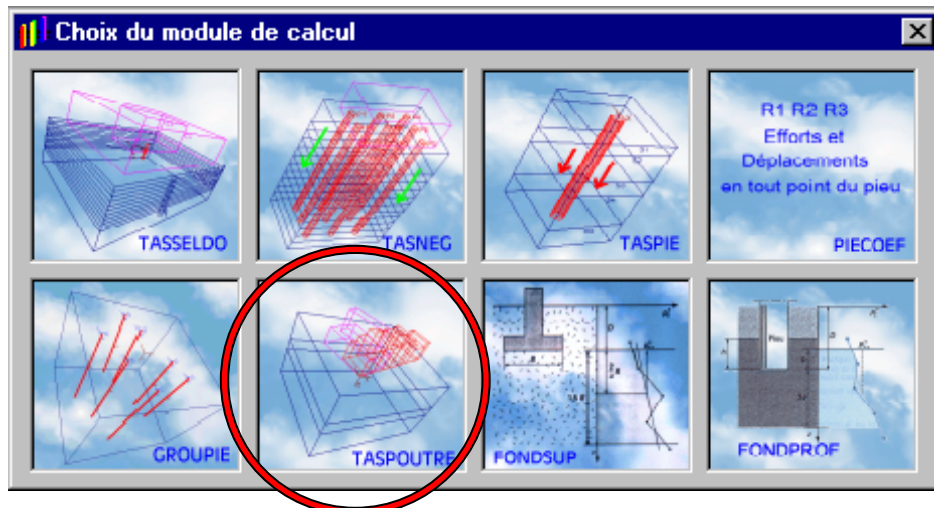


Figure I. 23 : Exemple 1 - Choix du module de calcul

6°) La fenêtre consacrée à l'entrée des données et à la lecture des résultats du module TASPOUTRE s'affiche.

Le premier onglet est consacré à la saisie des paramètres généraux de calcul :

- le titre du module Taspoutre : ici, "Exemple 1 de calcul Taspoutre" est choisi
- le nombre de subdivisions de chaque tronçon : $N = 5$ pour cet exemple
- le détail des résultats souhaité : afin d'obtenir un maximum d'informations, cocher, l'option "Détaillée"



Figure I. 24 : Exemple 1 - Paramètres généraux

7°) A chaque clic sur le bouton [Valider], la représentation graphique est mise à jour en fonction des nouvelles données entrées.

8°) Dans le second onglet "Caractéristiques des couches de sols", il faut transférer les valeurs saisies dans la base de données. Pour cela, dans la fenêtre Taspoutre, cliquer dans la première colonne "Nom de la couche", la boîte de dialogue "Famille des couches de sols" apparaît et permet de choisir une couche.

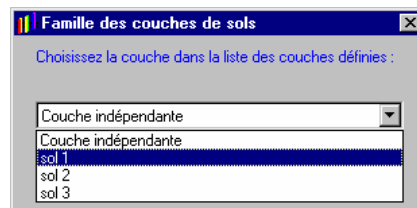


Figure I. 25 : Exemple 1 - Famille des couches de sol

Pour cet exemple, on choisit "sol 1", "sol 2" et "sol 3" respectivement dans la première, la seconde et la troisième ligne. Ainsi toutes les colonnes sont complétées exceptée celle définissant la limite de couche qu'il est alors nécessaire de compléter manuellement grâce aux valeurs proposées sur la Figure I. 20.

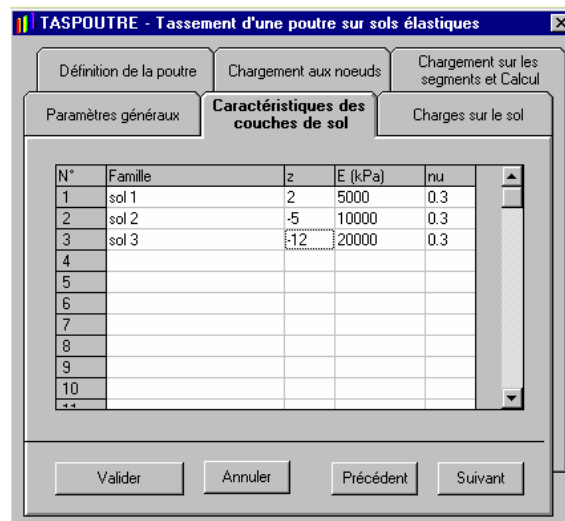


Figure I. 26 : Exemple 1 - Caractéristiques des couches de sols

Le troisième onglet "Charges sur le sol" doit être rempli avec la géométrie et les valeurs des chargements éventuels extérieurs à la poutre, mais qui influencent le tassement du sol sur lequel elle repose. Dans la première partie de cet exemple, aucune charge extérieure à la poutre n'est prise en considération. Passer à l'onglet suivant.

9°) L'onglet "Définition de la poutre" contient les caractéristiques géométriques de la poutre modélisée. Sa position est définie à partir :

- des coordonnées (XP, YP, ZP) d'un coin de la poutre, point pris comme origine du repère local lié à la poutre
- de l'angle θ que fait la direction principale de la poutre (direction en flexion) avec l'axe OX du repère fixe
- la longueur caractéristique DLY ("largeur") de la poutre dans la direction perpendiculaire à la direction principale

Pour l'exemple étudié, on saisit les valeurs suivantes :

- XP = 5m, YP = 0m, ZP = 5m
- $\theta = 20^\circ$
- DLY = 1m

Ensuite, le tableau situé en bas de la feuille permet l'entrée des données de rigidité et de discrétisation sur toute la longueur de la poutre.

La poutre dont on étudie le comportement a une inertie variable sur sa longueur. Aussi, lors de la saisie des données, trois tronçons sont décrits, comme le présente le TABLEAU I. 1.

N°	1	2	3	4
XL (m)	3	4	3	
EI (kN.m ² /m)	20000	83300	20000	
Nx	3	8	3	

Figure I. 27 : Exemple 1 - Définition de la poutre

Le bouton [Figure d'aide] situé à droite de la valeur de DLY à saisir est utile pour visualiser les conventions d'axes adoptées.

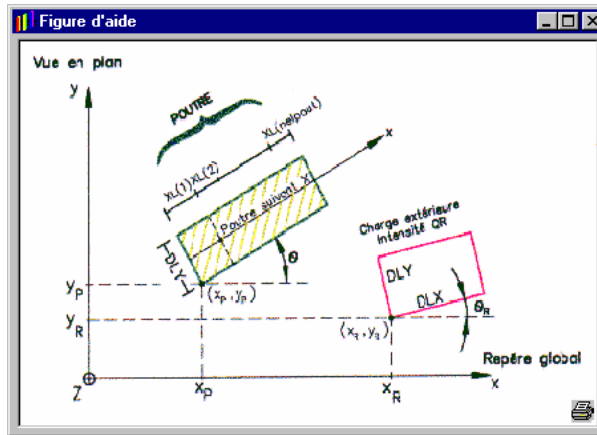


Figure I. 28 : Exemple 1 - Figure d'aide (onglet "Définition de la poutre")

10°) Les deux derniers onglets concernent le chargement de la poutre. Celui-ci peut comporter différents éléments de nature différentes :

- Force ponctuelle verticale
- Raideur en translation
- Moment de flexion
- Raideur en rotation
- Chargement trapézoïdal

Les quatre premiers cas font l'objet de l'onglet "Chargement aux nœuds" et le cinquième du dernier onglet nommé "Chargement sur les segments et Calcul".

De même que pour l'onglet "Définition de la poutre", dans chacun de ces deux onglets, un bouton [Figure d'aide] est disponible pour visualiser les conventions de signes adoptées.

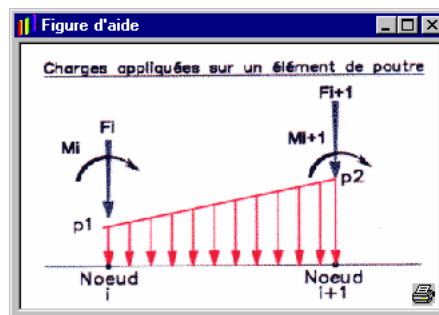


Figure I. 29 : Exemple 1 - Figure d'aide (onglet "Chargement sur les segments et Calcul")

Dans sa première partie, l'exemple présenté comprend uniquement un chargement uniforme de 100kPa répartie le long du tronçon 2 de la poutre. Aussi, le cinquième onglet est ici sans objet et le sixième et dernier onglet "Chargement sur les segments et Calcul" peut être directement complété.

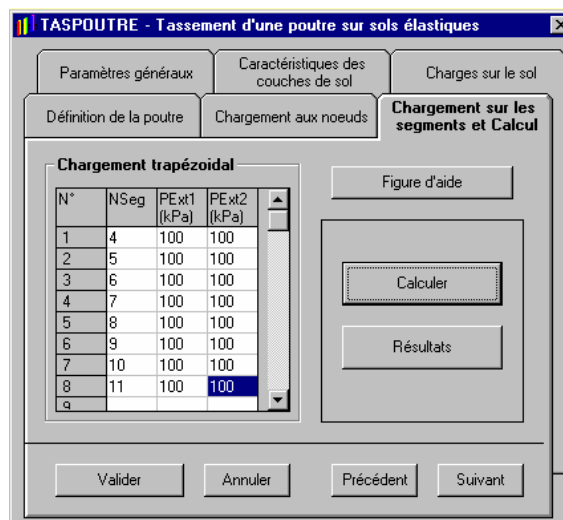


Figure I. 30 : Exemple 1 - Chargement sur les segments et Calcul

11°) Le calcul est lancé en cliquant sur le bouton [Calculer].

12°) Le fichier de résultats peut être obtenu en cliquant sur le bouton [Résultats], puis sur l'onglet "Fichier de résultats".

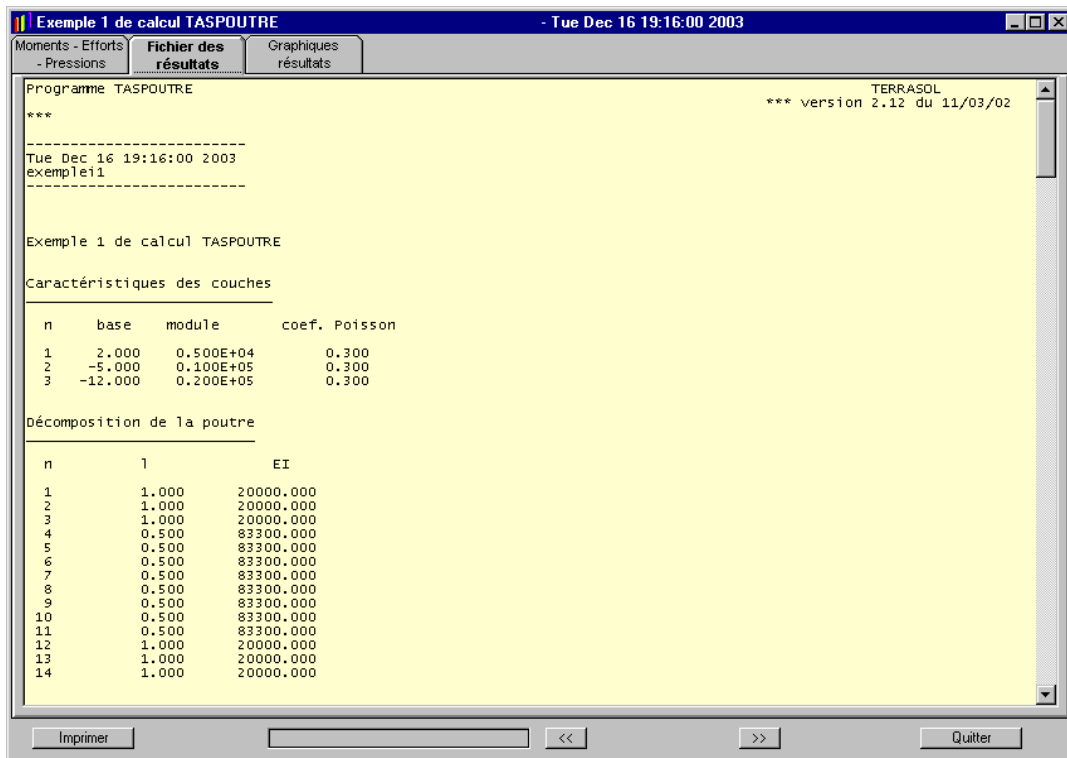


Figure I. 31 : Exemple 1 – Fichier de résultats

13°) Les résultats peuvent également être visualisés sous forme de graphiques dans l'onglet "Graphiques résultats".

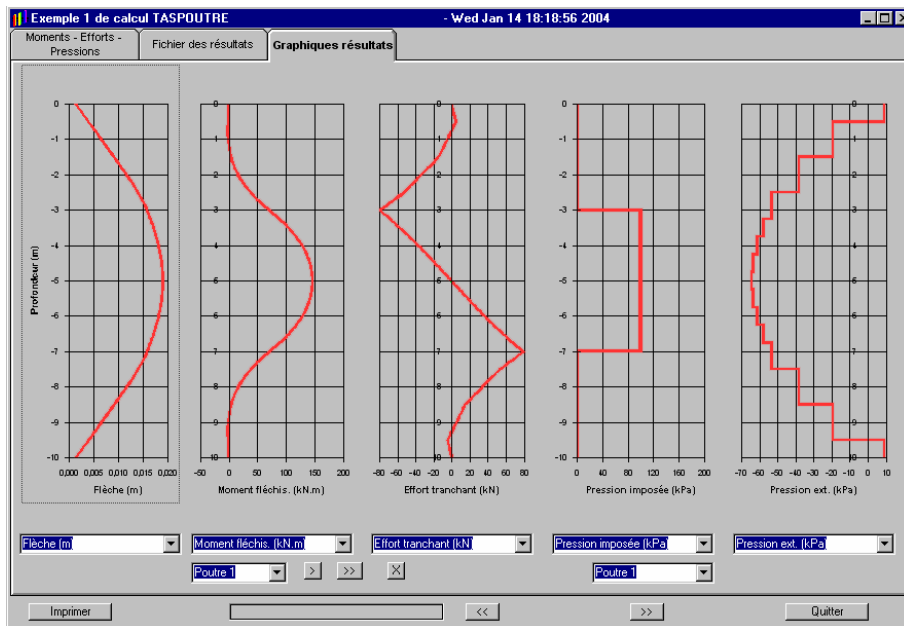


Figure I. 32 : Exemple 1 – Graphiques de résultats

14°) Sur la base du même exemple, une variante est proposée : on considère en plus de la pression une force concentrée en un point de la poutre et une surcharge extérieure en forme de talus.

Le schéma ci-dessous présente le positionnement du chargement. Les points A et B sont tels que A (4, 4, 5) et B (5, 0, 5).

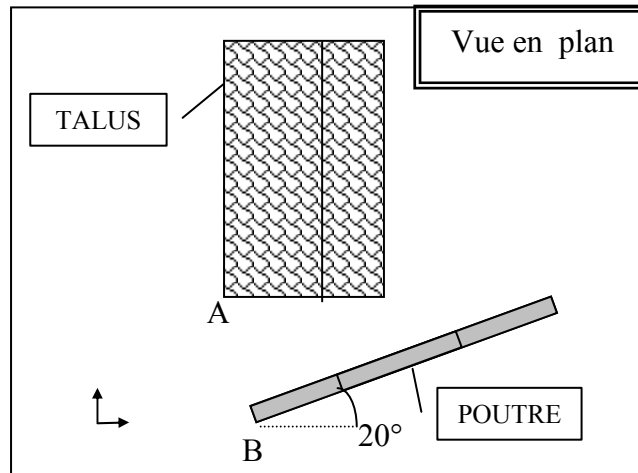


Figure I. 33 : Exemple 1 avec variante

15°) Sélectionner l'onglet "Charge sur le sol", puis le bouton [Chargements courants automatiques]. Dans la boîte de dialogue "Chargements courants automatiques" qui s'affiche, cocher l'option "Chargement type talus" puis cliquer sur [Valider]. La fenêtre qui s'ouvre a pour titre "Chargement pyramidal type talus" et doit être complétée avec les caractéristiques du talus (voir Figure I. 34 ci-dessous) :

- Coordonnées de A : $X_a = 4\text{m}$, $Y_a = 4\text{m}$, $Z_a = 5\text{m}$,
- Largeurs : $l = 3\text{m}$, $l_t = 5\text{m}$
- Longueur : $L = 8\text{m}$
- Nombre de tranches : $N = 20$
- Chargements : $q_1 = 10\text{kPa}$, $q_2 = 50\text{kPa}$, $q_3 = 40\text{kPa}$, $q_4 = 0\text{kPa}$,
- Direction : Suivant X

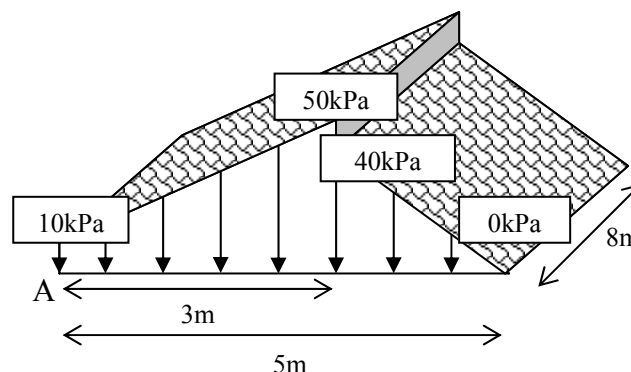


Figure I. 34 : Exemple 1 - Vue du talus

Appuyer sur le bouton [Générer] et le tableau du bas se remplit des caractéristiques des 20 charges rectangulaires formant le chargement de type talus.

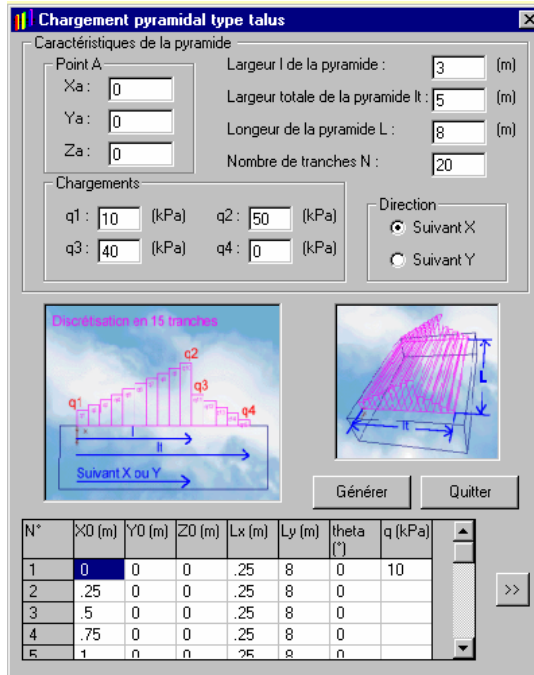


Figure I. 35 : Exemple 1 - Chargement pyramidal avec talus - avant ajustement de la largeur des colonnes -

Si toutes les valeurs n'apparaissent pas dans les colonnes (notamment dans la colonne de la charge q), positionner la flèche de la souris dans le tableau, cliquer sur le bouton droit de la souris et sélectionner "Ajuster la largeur des colonnes". Les nombres qui étaient de longueur trop importante pour être affichés apparaissent alors en totalité.

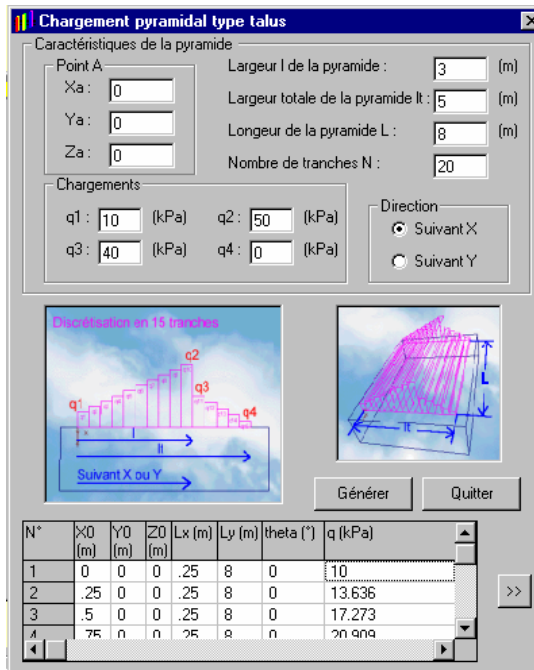



Figure I. 36 : Exemple 1 - Chargement pyramidal avec talus - après ajustement de la largeur des colonnes -

16°) Cliquer sur le bouton . La fenêtre se ferme et les valeurs générées sont transférées dans le tableau de "Charges sur le sol" dans la fenêtre "Taspoutre".

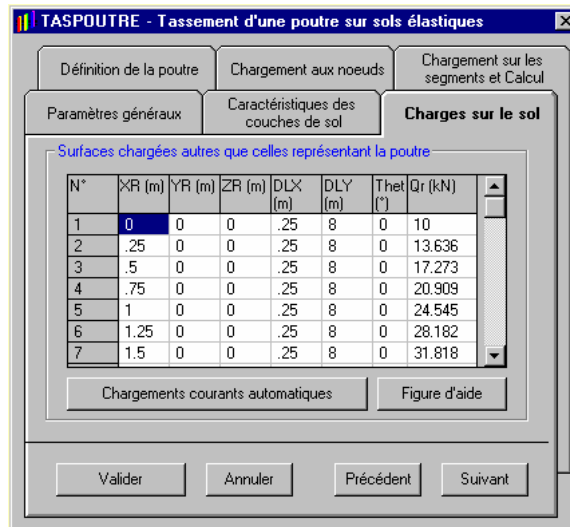


Figure I. 37 : Exemple 1 - Charges sur le sol

17°) Ensuite sélectionner l'onglet "Chargement aux nœuds". La force ponctuelle appliquée a une intensité de 100kN et est située au nœud numéro 12 (voir figure I.39).

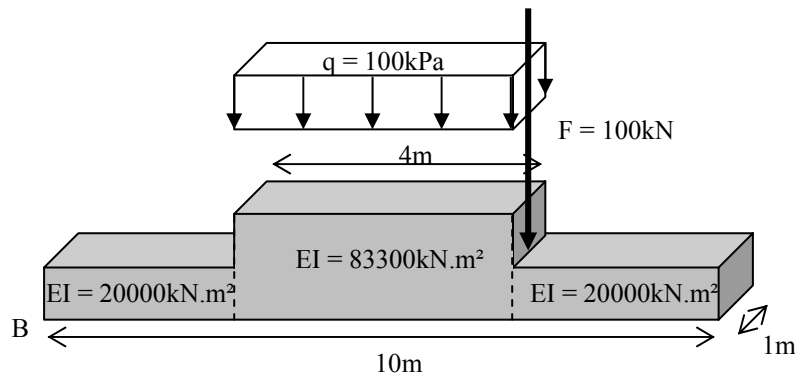


Figure I. 38 : Exemple 1 - Vue de la poutre

Dans la première ligne du tableau, entrer les données suivantes :

- Nœud : 12
- Force : 100
- Gforce : 0
- Moment : 0
- Gmoment : 0

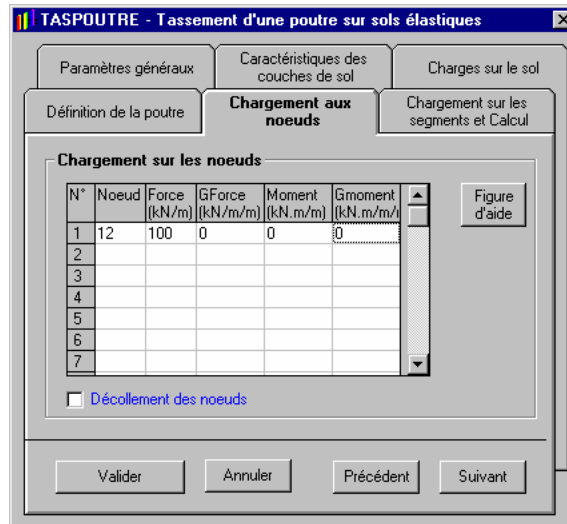


Figure I. 39 : Exemple 1 - Chargement aux noeuds

Le bouton [Figure d'aide] permet d'afficher un schéma présentant les conventions de signes adoptées.

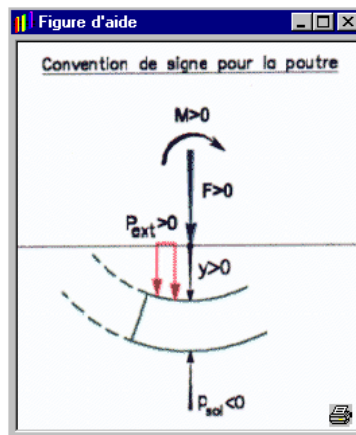


Figure I. 40 : Exemple 1 - Figure d'aide

18°) Enregistrer le projet. Sélectionner le dernier onglet. Lancer le calcul avec [Calculer] et visualiser les résultats avec le bouton [Résultats].

19°) La lecture du fichier de résultats détaillés permet de remarquer au niveau du tableau des solutions pour les pressions, tassements et flèches, que le nœud numéro 1 est concerné par le statut "non valide". En effet la réaction du sol en ce point est positive, ce qui représenterait une traction du sol. Aussi, il est nécessaire de déclarer ce nœud comme décollé.

Sélectionner l'onglet "Chargements aux nœuds" dans lequel il y a une case non cochée, en bas à gauche, intitulée "Décollement des nœuds". Cocher cette case. Un nouvel onglet nommé "Décollement des nœuds" s'insère, juste avant l'onglet "Chargement sur les segments et Calcul".

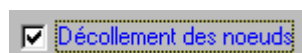


Figure I. 41 : Chargement aux nœuds (détail)

Sélectionner ce nouvel onglet et saisir le numéro du nœud décollé (c'est-à-dire 1) dans la première case.



Figure I. 42 : Décollement des noeuds

20°) Enregistrer le projet. Sélectionner le dernier onglet. Lancer le calcul avec [Calculer]. Vérifier dans le fichier de résultats ou sur le graphique que tous les résultats, en termes de pression et de déplacements, sont cohérents.

1.3.2. Exemple 2

1.3.2.1. Présentation du problème

Dans cet exemple, on étudie le tassement d'une poutre dont la géométrie est telle qu'elle comprend un renforcement sur sa surface inférieure (voir Figure I. 43).

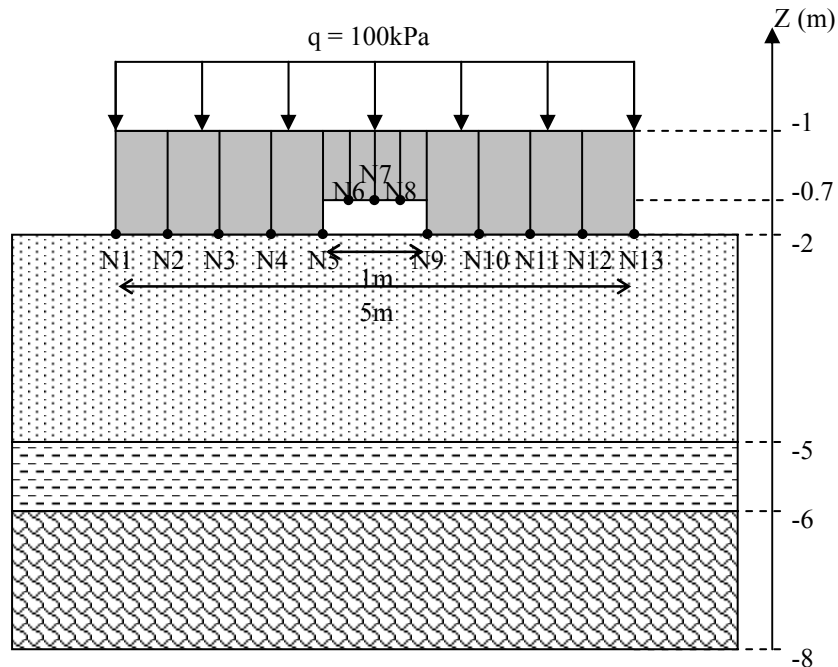


Figure I. 43 : Exemple 2

Les couches de sol sont définies dans le tableau ci-dessous.

Sol	Zbase (m)	Ztête (m)	Module d'Young E (kPa)	Coefficient de Poisson ν
Couche 1	-5	-2	5000	0.3
Couche 2	-6	-5	2000	0.3
Couche 3	-8	-6	10000	0.3

TABLEAU I. 2 : Exemple 2 – Caractéristiques des couches de sol

La poutre a les caractéristiques suivantes :

- Dimensions : 1m x 1m x 5m
avec le tronçon central de longueur 1m et de section 0.7m x 1m
- Module d'Young : $E = 10000\text{MPa}$
- Module de rigidité : $EI = 833000\text{kN/m}^2$
sauf sur le tronçon central où $EI = 286000\text{kN/m}^2$

Pour modéliser la géométrie singulière de la poutre et en particulier le fait que le sol ne touche pas la poutre dans le tronçon central, l'option de décollement des nœuds est utilisée ici.

Dans cette configuration, trois cas peuvent être distingués :

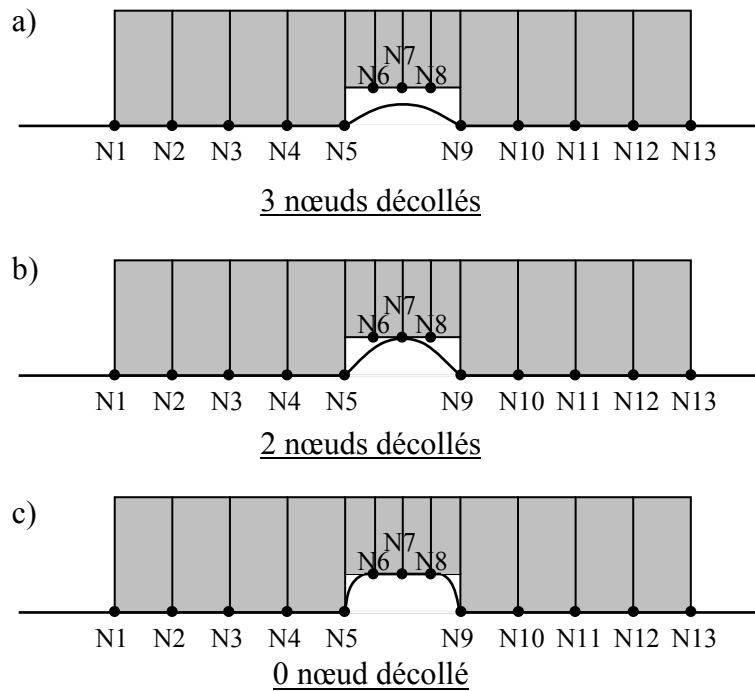


Figure I. 44 : Trois tassements relatifs possibles

Dans le cas a), les 3 nœuds N6, N7 et N8 ne touchent pas le sol car la flexion de la poutre et le tassement du sol ne sont pas suffisants.

La configuration b) est la configuration limite pour laquelle, la poutre et le sol sont en contact au niveau du nœud N7. Ainsi, pour ce nœud, le sol peut exercer une réaction et dans le programme, on ne déclare plus ce nœud comme décollé

Enfin en ce qui concerne le cas c), le tassement relatif du sol et/ou la flexion de la poutre sont si importants, que le tronçon central de la poutre est quasiment entièrement en contact avec le sol. C'est pourquoi, aucun nœud n'est décollé dans ce cas.

Dans cet exemple, on suppose a priori qu'on se trouve dans la configuration a) et on vérifie a posteriori que les valeurs des tassements et des flèches sont cohérentes. Si ce n'est pas le cas, on relance le calcul en posant comme hypothèse le cas b) et on vérifie les résultats. Si ceux-ci sont cohérents, le calcul est terminé, sinon il faut recommencer en supposant que la structure est dans le cas c).

I.3.2.2. Saisie des données

1°) Créer un nouveau projet dans le menu "Fichier" en cliquant sur "Nouveau projet complet". Saisir les données générales relatives au projet (Numéro d'affaire et Titre) dans la fenêtre "Titre – n° Affaire – Commentaire"

2°) Dans la fenêtre de la base de données, cocher l'option "Taspoutre" et compléter les trois colonnes avec les informations comprises dans le TABLEAU I. 2.

N°	Nom de la couche de sol	Module d'Young E (kPa)	Coefficient de Poisson nu
1	couche 1	5000	0.3
2	couche 2	2000	0.3
3	couche 3	10000	0.3
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			

Figure I. 45 : Exemple 2 – Base de données générales des caractéristiques des couches de sol
Valider en cliquant sur [Valider et Mettre à jour les données dans les modules de calcul actifs].

3°) Créer un nouveau module TASPOUTRE dans le menu "Fichier" en cliquant sur "Nouveau Module".

4°) Dans le premier onglet, compléter :

- Le titre : "exemple 2"
- Le nombre de subdivisions : $N = 2$
- Le type d'impression : Détaillée

5°) Dans le second onglet, compléter le tableau grâce à la base de données et la colonne des cotes à partir du TABLEAU I. 2.

N°	Famille	z	E (kPa)	nu
1	couche 1	-5	5000	0.3
2	couche 2	-6	2000	0.3
3	couche 3	-8	10000	0.3
4				

Figure I. 46 : Exemple 2 – Caractéristiques des couches de sols

6°) On ne considère ici aucune charge sur le sol, aux alentours de la poutre. Aussi, le troisième onglet n'est pas à remplir.

7°) Dans le quatrième onglet, la poutre du projet est définie :

- Centre du repère : $P(0 ; 0 ; -2)$

- Orientation : $\theta = 0^\circ$
- Largeur : $DLY = 1\text{m}$
- Longueur et Produit d'Inertie : $XL = 2\text{m}$, $EI = 833000\text{kN/m}^2$, $N = 4$
 $XL = 1\text{m}$, $EI = 286000\text{kN/m}^2$, $N = 4$
 $XL = 2\text{m}$, $EI = 833000\text{kN/m}^2$, $N = 4$

8°) Aucun chargement aux nœuds n'est imposé dans cet exemple. Aussi, le cinquième onglet n'est pas à compléter. Cependant, il est tout de même nécessaire, dans cet onglet, de cocher la case (Décollement des nœuds). Ainsi, l'onglet caché "Décollement des nœuds apparaît"

9°) Dans l'onglet "Décollement des nœuds", introduire le numéro des nœuds à décoller. En cas de doute, il est possible de les visualiser en sélectionnant l'option "Poutre" dans la fenêtre de "Pilotage graphique 3D". Cette option permet d'afficher les numéros de segments, de nœuds et de poutres sur le graphique 3D

Dans cet exemple, les nœuds à décoller sont les nœuds 6, 7 et 8.

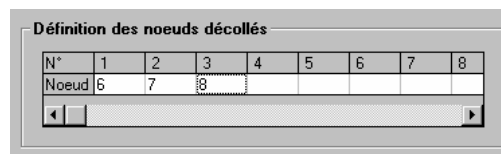


Figure I. 47 : Exemple 2 – Décollement des nœuds

10°) Enfin dans le dernier onglet, imposer une charge uniforme de 50kPa sur les 12 segments de la poutre.

N°	NSeg	PExt1 (kPa)	PExt2 (kPa)
6	6	50	50
7	7	50	50
8	8	50	50
9	9	50	50
10	10	50	50
11	11	50	50
12	12	50	50
13			
14			

Figure I. 48 : Exemple 2 – Chargement sur les segments et Calcul

11°) Enregistrer et lancer le calcul avec le bouton [Calculer].

12°) Cliquer sur [Résultats] pour afficher les résultats

13°) Dans le fichier des résultats, les nœuds décollés sont déclarés non valides parce que la flèche de la poutre est plus grande que le tassement du sol.

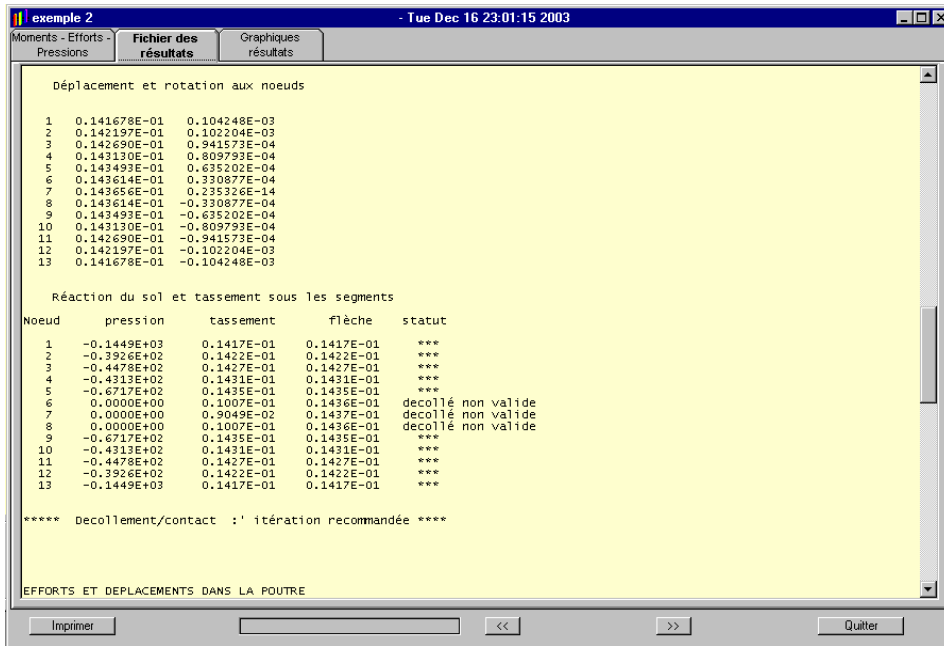


Figure I. 49 : Exemple 2 – Fichier de résultats

Cependant, étant donné que la différence entre la flèche et le tassement est inférieure à la hauteur de l'échancrure de la poutre ($h = 30\text{cm}$), le résultat est tout à fait cohérent. La structure de cet exemple est donc dans la configuration a).

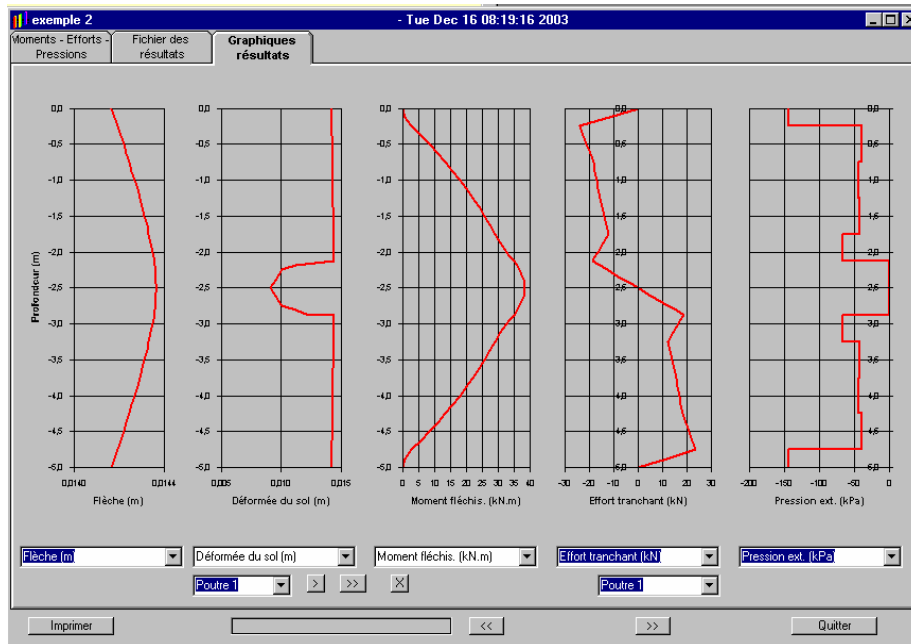


Figure I. 50 : Exemple 2 – Graphiques

L'onglet [Graphiques résultats] donne accès aux graphiques qui permettent également de visualiser, d'une part, la différence entre la flèche de la poutre et la déformée du sol (graphiques 1 et 2) et d'autre part, l'absence de réaction du sol sur le tronçon central (graphique 5)

1.3.3. Exemple 3

1.3.3.1. Présentation du problème

Cet exemple traite de la modélisation des fondations mixtes, c'est-à-dire des fondations pour lesquelles les efforts sont repris non seulement par les pieux mais également pas la semelle. Le schéma ci-dessous présente la structure étudiée, composée d'un pieu foré et d'une semelle, sous une charge de 400kPa.

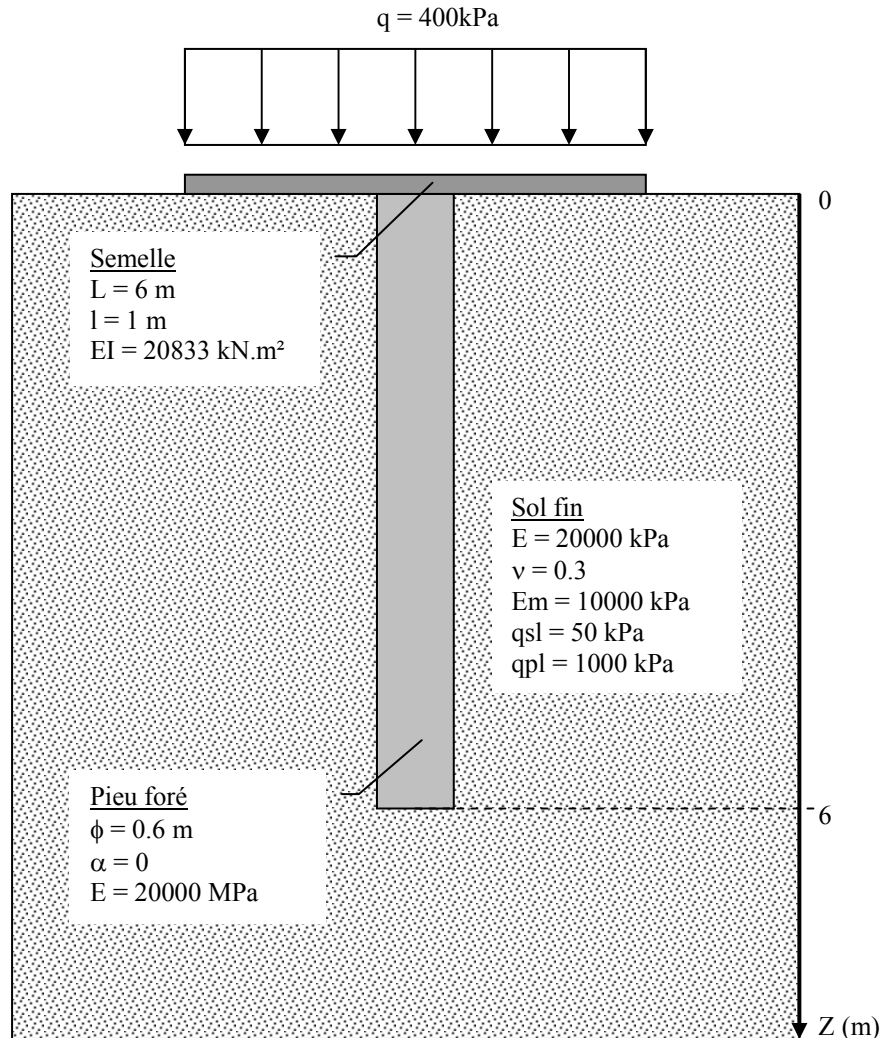


Figure I. 51 : Exemple 3

Le tassement de la semelle est calculé grâce à un calcul TASPOUTRE. Le tassement du sol autour du pieu est déduit d'un calcul TASSELDO et le tassement du pieu lui-même est le résultat d'un calcul TASPIE.

La semelle et le pieu étant liés, la raideur du pieu doit être imposée au niveau de la semelle et le déplacement de la semelle et celui du pieu doivent être égaux. De plus, le tassement du sol dû au tassement de la semelle doit être pris en compte en tant que tassement imposé dans le calcul TASPIE.

Afin de converger vers la vérification de trois conditions, plusieurs itérations sont nécessaires. Le choix du premier calcul est indifférent. On commence ici avec le calcul TASPIE.

I.3.3.2. Constitution du fichier TASPIE

1°) Créer un nouveau projet FoXta. Compléter les colonnes de la base de données concernant les modules TASPIE et TASPOUTRE à partir de la Figure I. 51.

Base de données générales des caractéristiques des couches de sol

Nom du (ou des) modules(s) concerné(s)

Tous
 Tasseldo sans calcul oedométrique
 Tasnég
 Piecoef
 FondSup
 Taspoutre
 FondProf

Unités

m/s/MN/MPa
 m/s/kN/kPa

N°	Nom de la couche de sol	Module d'Young E (kPa)	Coefficient de Poisson nu
1	couche de sol	20000	0.3
2			
3			

Figure I. 52 : Exemple 3 – TASPIE – Base de données (module TASPOUTRE)

Base de données générales des caractéristiques des couches de sol

Nom du (ou des) modules(s) concerné(s)

Tous
 Tasseldo sans calcul oedométrique
 Tasnég
 Piecoef
 FondSup
 Taspie
 Taspoutre
 FondProf

Unités

m/s/MN/MPa
 m/s/kN/kPa

N°	Nom de la couche de sol	Module pressiométrique EM (kPa)	Coeffic rhéolo alpha	Frottement latéral unitaire qs (kPa)
1	couche de sol	10000	0	50
2				
3				

Figure I. 53 : Exemple 3 – TASPIE – Base de données (module TASPIE)

2°) Créer un nouveau module TASPIE. Dans le premier onglet, compléter les informations suivantes :

TITRE : "COURBE DE CHARGEMENT DU PIEU 600"

- Section : circulaire
- Cote de référence : $Z = 0$
- Lois de mobilisation du frottement et de l'effort en pointe déduites des formules de FRANK et ZHAO

3°) Le second onglet décrit le pieu : - Diamètre : 0.6m
 - Inclinaison : 0°
 - Module d'Young : $E = 20 \cdot 10^6 \text{ kPa}$
 - Pieu sans refoulement

4°) Le tableau du troisième onglet est complété avec la base de données. Afin de mieux répartir les tassements imposés, la couche de sol de 8m de profondeur est subdivisée en 4 sous couches de 2m de hauteur, pour lesquels $n = 4$ et $KFR = 1$ (sol fin).

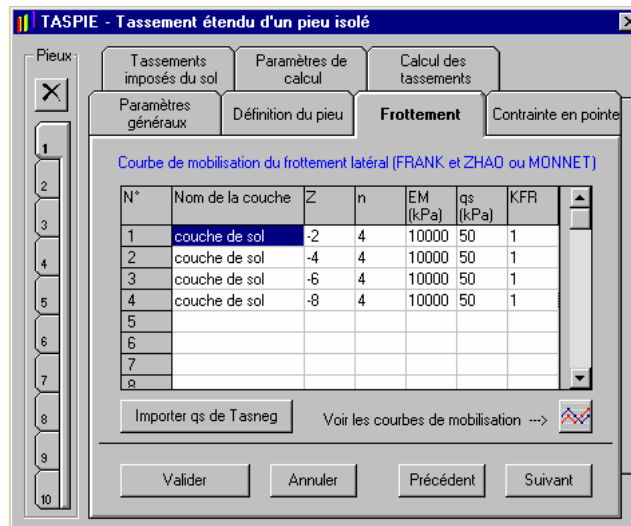


Figure I. 54 : Exemple 3 – TASPIE – Frottement FRANK et ZHAO

5°) Dans le quatrième onglet, l'effort de pointe à saisir est $q_{pl} = 1000 \text{ kPa}$.

6°) Le tassement imposé est encore inconnu. Aussi, cet onglet n'est pas complété lors de la première itération.

7°) Les paramètres de calcul proposés sont : - critère de convergence : 1.10^{-4}
 - Impression normale
 - NPAS = 99
 - $y_{P\text{MIN}} = 1.10^{-6} \text{ m}$
 - $y_{P\text{MAX}} = 1.64.10^{-2} \text{ m}$ (valeur pas défaut)

8°) Enregistrer et lancer le calcul.

Pour le calcul TASPOUTRE, la valeur de la raideur du pieu est nécessaire. Cependant celle-ci varie en fonction du déplacement du pieu et donc de la semelle. Cette information étant encore inconnue, on peut commencer en utilisant la valeur de la raideur aux ELS quasi permanent : 333000 kN/m (Voir dernier tableau du fichier de résultats).

TABLEAU RECAPITULATIF			
	Charge limite	Déplacement	Raideur
--- Etat limite de service :			
: combinaison quasi permanente	477.97	0.0014	0.333E+06
: combinaison rare	608.33	0.0024	0.256E+06
--- Etat limite ultime :			
: combinaison fondamentale	740.52	0.0033	0.221E+06
: combinaison accidentelle	863.94	0.0045	0.191E+06
	0.00	*****	0.000E+00

Figure I. 55 : Exemple 3 – TASPIE – Fichier de résultats

I.3.3.3. Constitution du fichier TASPOUTRE

9°) Dans le même projet, créer un nouveau module TASPOUTRE. Dans le premier onglet, saisir les données suivantes :

- Titre : "Fondation mixte : tassement de la semelle"
- Nombre de subdivisions : $N = 5$
- Impression peu détaillée

10°) Le tableau des caractéristiques de couches du second onglet est rempli grâce à la base de données. On considère une couche de sol de 16m (= 2 x profondeur du pieu) que l'on subdivise en 8 sous couches de 2m de hauteur.

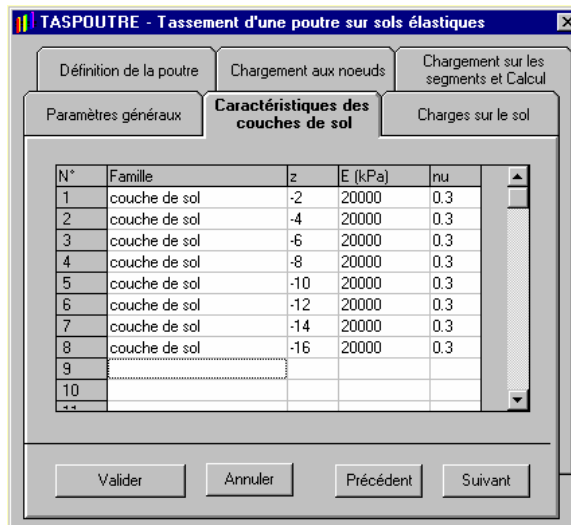


Figure I. 56 : Exemple 3 – TASPOUTRE – Caractéristiques des couches de sol

11°) Le troisième onglet n'est pas à compléter car on ne considère aucune charge sur le sol.

12°) Dans le quatrième onglet, les caractéristiques de la poutre sont décrites :

COIN ORIGINE (0 ; 0 ; 0)

- Orientation : $\theta = 0^\circ$
- Largeur DLY = 1

Dans le tableau inférieur, la poutre est déclarée en deux demi-poutres identiques telles que :

XL = 3M

- $EI = 20833 \text{ kN.m}^2$
- $N_x = 3$

13°) Dans l'onglet "Chargement aux nœuds", la présence du pieu est définie en déclarant une raideur verticale de 333000 kN.m/ml (voir Figure I. 55) au droit du nœud 4 (milieu de la poutre).

N°	Noeud	Force (kN/m)	GForce (kN/m/m)	Moment (kN.m/m)	Gmoment (kN.m/m/m)
1	4	0	333000	0	0
2					
3					

Figure I. 57 : Exemple 3 – TASPOUTRE – Chargement aux nœuds


14°) Dans le dernier onglet, saisir une pression uniforme ($P_{ext1} = P_{ext2}$) de 400kPa sur les 6 segments de la poutre. Enregistrer et lancer le calcul.

Dans le fichier de résultats ou dans la fenêtre des graphiques de résultats, rechercher la valeur du déplacement au point de liaison entre la poutre et le pieu (milieu de la semelle, nœud 4).

Pour cet première itération, le déplacement est égal à $y_1 = 3.8\text{mm}$. Cette valeur sera utile pour déterminer la valeur de la raideur du pieu à considérer dans le prochain calcul TASPIE.

I.3.3.4. Constitution du fichier TASSELDO

Lors du calcul TASPOUTRE, un fichier supplémentaire avec l'extension .F02 est créé et a la structure d'un fichier TASSELDO. Dans ce fichier, le sol a les mêmes caractéristiques que celui déclaré dans le module TASPOUTRE correspondant et le chargement imposé correspond à la réaction du sol sous la semelle. Ainsi, le lancement de ce calcul TASSELDO permet de connaître l'évolution des tassements avec la profondeur.

15°) Importer le module exemple3.F02 (cliquer sur  ou dans le menu Fichier, cliquer sur "Importer..")

16°) Lancer le calcul.

I.3.3.5. Résultats des itérations

L'enchaînement des itérations est alors le suivant :

- 1) **Module TASPIE** : dans le cinquième onglet, décocher la case "Pas de tassement imposé" ; importer le résultat du calcul de Tassement 3D du fichier Tasseldo exemple3.F02 au point n°4 (nœud 4) et cliquer sur [Rafraîchissement de Z]. Prendre un coefficient de pondération du frottement négatif de 1.3
- 2) **Module TASPIE** : lancer le calcul et rechercher la valeur de la raideur $\mu(n)$ correspondant au déplacement $y(n-1)$ de la semelle relevé à l'itération précédente. Si nécessaire, affiner l'intervalle de calcul (NPAS, yPMIN, yPMAX)
- 3) **Module TASPOUTRE** : imposer une raideur verticale $\mu(n)$ au droit du nœud 4
- 4) **Module TASPOUTRE** : lancer le calcul et rechercher la valeur $y(n)$ du déplacement de la semelle au point de liaison entre la semelle et le pieu
- 5) **Module TASSELDO** : Importer le fichier exemple3.F02 et lancer le calcul
- 6) Recommencer au 1) jusqu'à ce que $\mu(n) = \mu(n-1)$

Les résultats des itérations sont rassemblés dans le tableau suivant :

Itérations	Raideur du pieu μ (kN/m)	Tassement semelle et pieu (mm)
Itération 1	330000	3.8
Itération 2	30200	20.5
Itération 3	49200	16.0
Itération 4	60000	14.2
Itération 5	65500	13.5
Itération 6	68000	13.2
Itération 7	69200	13.0
Itération 8	69800	12.9
Itération 9	70100	12.9
Itération 10	70200	12.9
Itération 11	70200	-

TABLEAU I. 3 : Exemple 3 – Résultats des itérations successives

En conclusion, le tassement de la semelle et du pieu est de 12.9mm et les modules TASPOUTRE et TASPIE nous permettent de visualiser :

- les déplacements et les efforts le long du pieu (voir Figure I. 58)
- les déplacements et les efforts dans la semelle (voir Figure I. 59)

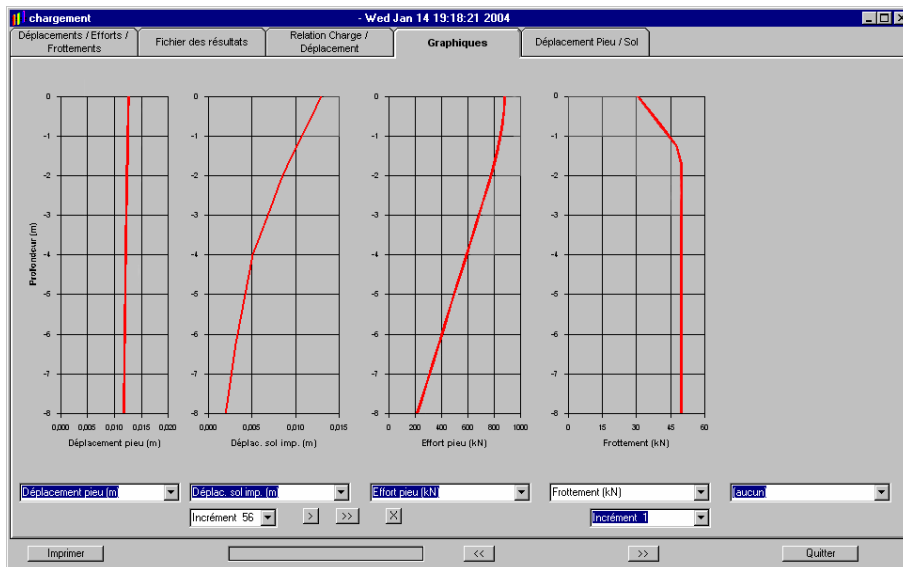


Figure I. 58 : Exemple 3 – TASPIE – Graphiques de résultats

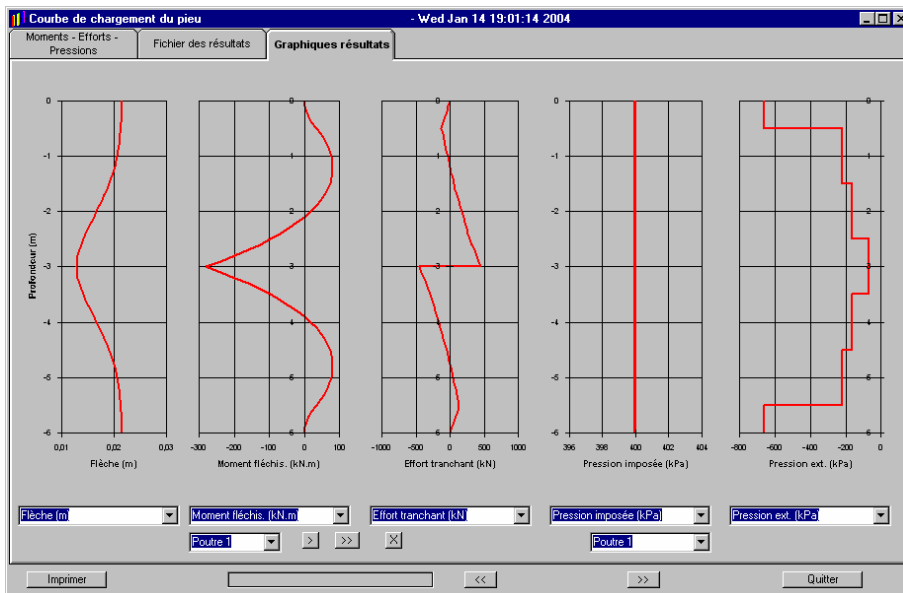


Figure I. 59 : Exemple 3 – TASPOUTRE – Graphiques de résultats

I.4 CONSTITUTION DU FICHIER TASPOUTRE

Le fichier de données doit porter le nom "nomdefichier.tpt". Les paramètres à introduire sont présentés ci-après. Ils doivent être entrés dans l'ordre indiqué.

■ **TITRE** (80 caractères maximum)

■ **(/) NSUB (/) ITRAC**

NSUB : Chaque tronçon de la poutre est subdivisé en 2.NSUB éléments lors de l'édition des résultats. Par défaut NSUB = 10.

ITRAC : Code de sortie détaillée. Par défaut ITRAC = 0 et si ITRAC = 1, édition des réactions et des rotations aux nœuds.

■ **NBC** Nombre de couches de terrain (50 maximum)

Pour chaque couche i ($i = 1, \dots, NBC$) de la plus superficielle à la plus profonde

■ **ZC(i) EC(i) NUC(i)**

ZC(i) : Cote de la base de la couche i

EC(i) : Module d'Young de la couche i

NUC(i) : Coefficient de Poisson de la couche i

■ **NELPOUT NBPOUT**

NELPOUT : Nombre d'éléments finis modélisant la poutre

NBPOUT : Nombre de tronçons composant la poutre

■ **XP YP ZP TETA DLY**

Définition du repère d'axes de la poutre :

XP, YP, ZP: Coordonnées d'un coin de la poutre

TETA : Orientation de la poutre dans le plan (Oxy)

DLY : Largeur de la poutre

Pour chaque tronçon de poutre i ($i = 1, \dots, NBPOUT$)

■ **XL(i) EI(i) NX(i)**

XL(i) : Longueur du tronçon i suivant (Ox) dans le repère local de la poutre

EI(i) : Produit d'inertie du tronçon i par mètre linéaire de largeur de l'élément

NX(i) : Nombre d'éléments finis à générer dans le tronçon i de longueur XL(i)

■ **NELEXT** Nombre de surfaces chargées autres que celles représentant la poutre (= charges extérieures). Il faut que NELPOUT + NELEXT \leq 250.

Pour chaque charge extérieure i (i = 1, ..., NELEXT)**■ XR(i) YR(i) ZR(i) DLX(i) DLY(i) TETA(i) QR(i)**

XR(i), YR(i), ZR(i) :

Coordonnées d'un sommet du rectangle i

DLX(i), DLY(i) :

Longueurs des cotés du rectangle i

TETA(i) : Angle en degrés que fait le côté DLX avec l'axe (Ox) du repère général

QR(i) : Charge uniforme appliquée sur le rectangle

■ NLD Nombre de nœuds décollés (par défaut NLD = 0)**SI NLD ≠ 0, énumérer, l'un en dessous de l'autre, les numéros des nœuds décollés****■ NLN** Nombre de nœuds au niveau desquels des conditions de chargement (forces et moments) sont imposés (51 maximum)**Pour chaque nœud chargé i (i = 1, ..., NLN)****■ NOEU(i) FORCE(i) GFORCE(i) MOMENT(i) GMOMENT(i)**

NOEU(i) : Numéro du nœud où est appliqué le chargement

FORCE(i) : Effort vertical appliqué (positif vers le bas) par mètre linéaire de largeur

GFORCE(i): Raideur verticale au droit du nœud

*Nota : l'effort appliqué à la poutre est : $X = FORCE(i) - GFORCE(i) \cdot y(i)$
avec $y(i)$ le déplacement au nœud considéré NOEU(i)*

MOMENT(i) :

Moment appliqué (convention de signe illustrée à la Fig. I.1) par mètre linéaire de largeur

GMOMENT(i):

Raideur spirale au droit du nœud

*Nota : le moment appliqué à la poutre est : $M = MOMENT(i) - GMOMENT(i) \cdot y'(i)$
avec $y'(i)$ la rotation au nœud considéré NOEU(i)***■ NLS** Nombre de segments soumis à une pression trapézoïdale (50 maximum)**Pour chaque segment chargé i (i = 1, ..., NLS)****■ NSEG(i) PEXT1(i) PEXT2(i)**

NSEG(i) : Numéro du segment

PEXT1(i), PEXT2(i) :

Pressions aux extrémités de l'élément