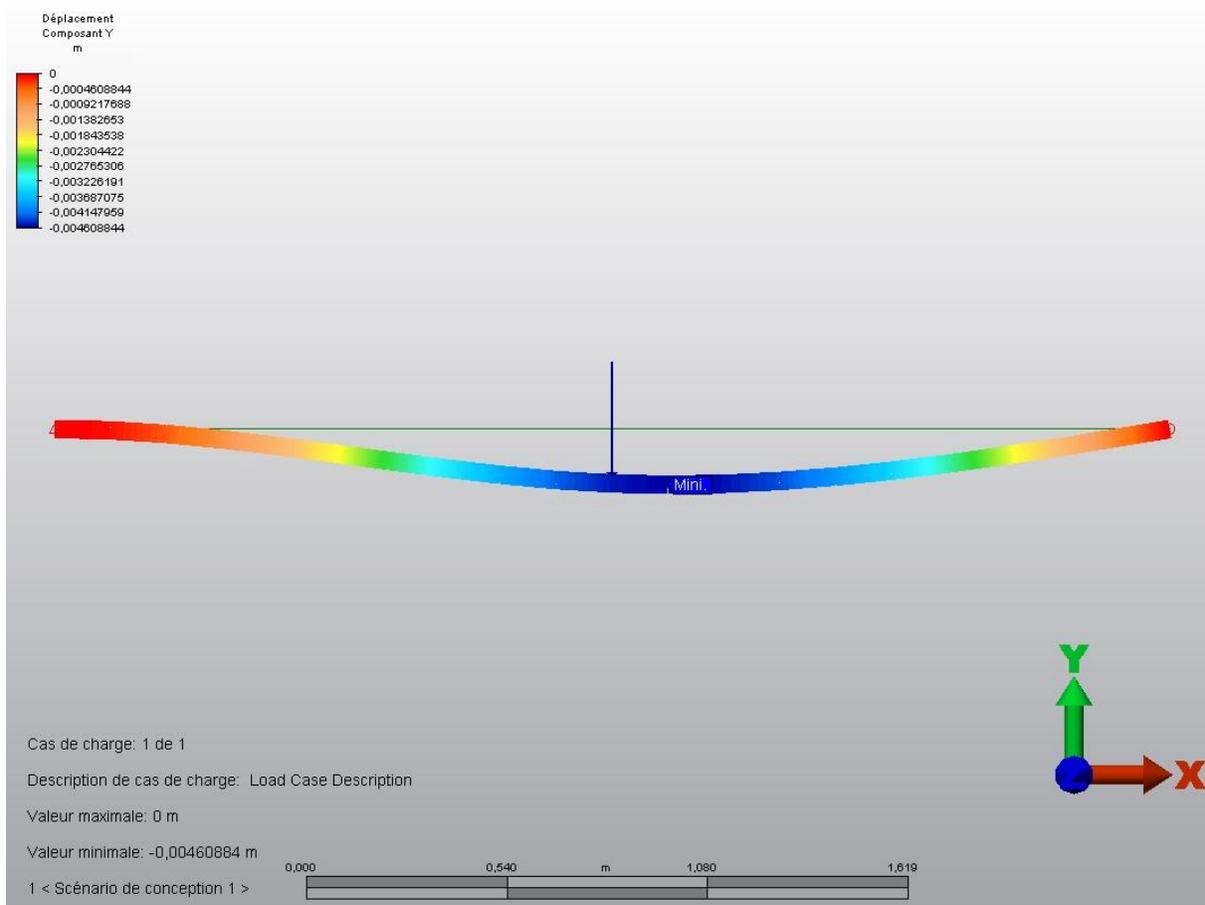


TRAVAUX PRATIQUES DE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES

*Utilisation du logiciel de calculs
par éléments finis « Autodesk Simulation Mechanical »*

TP n° 1 : Etude d'une poutre en flexion



Etude d'une poutre en flexion

1^{er} modèle : poutre modélisée par sa ligne moyenne

On se propose de modéliser une poutre de longueur $L=3$ m et de section carré (coté $a=5$ cm). Soumise à une charge ponctuelle d'intensité $F = 2000$ newtons appliquée en son milieu, la poutre est parfaitement encastree en son extrémité gauche et repose sur un appui simple de l'autre coté. Elle est supposée être en acier de module d'Young $210\,000$ N/mm², le coefficient de Poisson étant de 0.28 .

L'étude de cette poutre nécessite trois phases :

- modélisation
- calculs
- résultats

Pour cette 1^{ère} partie, la poutre est modélisée par sa ligne moyenne.

I. Modélisation

1. Création du modèle

Dans cette section, nous allons définir la géométrie de la poutre ainsi que les conditions aux limites et le cas de chargement.

Démarrage du logiciel « Autodesk Simulation Mechanical »

**"Démarrer/Programmes/
Autodesk/Autodesk
Simulation Mechanical"
Puis cliquer sur l'icône**

Cliquer sur le menu « Démarrer » puis « Programmes », « Autodesk Simulation Mechanical » et enfin sur l'icône correspondant.

Note: Vous pouvez également double-cliquer à partir du bureau sur l'icône « Autodesk Simulation Mechanical ».

Création d'un nouveau modèle

L'assistant de création d'un nouveau modèle apparaît.

"Nouveau" "Nouveau"	Cliquer sur « Nouveau » à gauche puis le bouton de commande « Nouveau » à droite.
"Enregistrer sous"	Sélectionner un répertoire pour enregistrer votre travail. Vous pouvez sauvegarder sur le bureau du PC mais n'oubliez pas de copier vos fichiers et dossiers sur Clé USB ou sur votre bureau virtuel en fin de séance. Les données sont supprimées automatiquement dès que le PC est éteint.
Tp11	Puis enregistrer le modèle sous « Tp11 ».

Spécifier le type d'analyse

Ouvrir le menu "Analyse" pour définir le type d'analyse:

"Analyse" "Type"	Cliquer sur "Analyse" puis sur "Type"
"Linéaire" "Contrainte statique...."	Cliquer sur "Linéaire" puis sur "Contrainte statique avec des modèles de matériaux linéaires". Ces paramètres sont sélectionnés par défaut.

Définition du système d'unité

Utiliser "Editeur MEF" (fenêtre à gauche) pour définir le système d'unités du modèle.

"Editeur MEF" "Systèmes d'unités"	A partir de l'onglet "Editeur MEF", double-cliquer sur "Systèmes d'unités <Anglais (in)>".
"Metric mks (SI)"	Sélectionner l'option « Metric mks (SI) ». Vérifier que la force est en N et la longueur en m.
"OK"	Cliquer sur "OK".

Dessin de la poutre

"Afficher: Orientation: Vue de dessus"	Sélectionner la vue de dessus dans « Afficher/Orientation ».
--	--

Dessiner la ligne neutre représentant la poutre.

"Dessiner:" "Ligne"	Dans le menu "Dessiner", sélectionner "Ligne". Une fenêtre apparaît permettant de définir les lignes.
"Désactiver" Ligne de construction	Désactiver la fonction "Utiliser en tant que construction"
"3" dans le champ "X" "Entrée" "Entrée" Fermer la fenêtre	Taper "3" dans le champ "X" puis "Entrée" (création du point B (3,0,0)) Taper de nouveau sur "Entrée" (création du point A (0,0,0)). Puis fermer la fenêtre.
"Afficher" "Inclure"	Zoom de la poutre.
"Sélection" Dans "Sélectionner" "Ligne"	Dans le menu "Sélection", à la rubrique "Sélectionner", cliquer sur "Lignes". Cliquer sur la ligne créée AB (changement de couleur)
"Dessiner" dans "Modifier" "Diviser" "Nbre de lignes : 20" "OK"	Dans le menu "Dessiner", à la rubrique "Modifier", cliquer sur "Diviser" puis taper 20 puis OK, pour diviser la poutre en 20 éléments. Vérifier la division en déplaçant le curseur de la souris sur la poutre

Définition des conditions aux limites

Au point A (encastrement)

"Sélection" "Sélectionner: Sommets"	Pour sélectionner un nœud, activer « Sélectionner : Sommets » dans le menu « Sélection ».
Sélectionner le point A "Ajouter : Contrainte générale"	Sélectionner le point A (0,0,0), cliquer sur « Ajouter » puis « Contrainte générale ».
"Fixe" "OK"	Sélectionner « Fixe » dans la fenêtre « Prédéfini » puis « OK ». Cette opération permet de définir un encastrement.

Au point B (appui simple)

Sélectionner le point B "Ajouter : Contrainte générale"	Sélectionner le point B (3,0,0), cliquer sur « Ajouter » puis « Contrainte générale ».
"Tx, Ty et Rx Bloquées"	Bloquer les degrés de liberté (translation et rotation) Tx, Ty et Rx.
"OK" puis "Afficher:Inclure"	

Définition du cas de chargement

Pour visualiser la position des nœuds sur la poutre (en particulier celui au milieu), cliquer sur Afficher/Sommets d'extrémité.

Sélectionner le milieu de la poutre "Ajouter : Force Nodale"	Sélectionner le point (1.5,0,0) puis par un click droit, sélectionner « Ajouter : Force Nodale ».
"Magnitude : -2000"	Taper -2000 dans "Magnitude".
" Direction Y "	Cliquer sur la direction Y.
"OK" puis "Afficher:Inclure"	

Enregistrement du fichier

	"Fichier:Enregistrer"	
---	------------------------------	--

2. Propriétés de la poutre

Dans l'éditeur MEF (fenêtre à gauche), nous allons pouvoir définir les paramètres de la poutre et en particulier à la rubrique « Composant 1 »:

- le type d'éléments (Poutre)
- les propriétés géométriques de la section (Section et Moments)
- les propriétés élastiques du matériau (Module E et coefficient de Poisson)

Propriétés de la poutre

"Type d'élément"	Dans « Composant 1 », faire un click droit sur "Type d'élément".
"Poutre"	Cliquer sur l'option "Poutre".

Définition des propriétés de la section droite

"Définition de l'élément"	Dans « Composant 1 », faire un click droit sur "Définition de l'élément".
"Modifier la définition d'un élément"	Puis Cliquer sur l'option " Modifier la définition d'un élément".
Sélectionner la ligne de données	Sélectionner la ligne du tableau donnant les propriétés par défaut.

"Bibliothèques de sections" "User-Defined" "Rectangular" "0,05" pour b et "0,05" pour "h"	Cliquer sur « Bibliothèques de sections » Sélectionner « Rectangular » dans « User-Defined » de la rubrique Section (à droite) Définir les valeurs de b et h (b=0,05 m et h=0,05 m)
"OK" "OK"	

Définition des propriétés du matériau

"Matériau"	Dans « Composant 1 », faire un click droit sur "Matériau".
"Modifier le matériau"	Puis cliquer sur l'option "Modifier le matériau".
"Modifier les propriétés"	Cliquer sur « Modifier les propriétés ».
"Masse volumique" 7800	Sous " Masse volumique ", taper la densité du matériau, 7800 kg/m ³
"Module d'élasticité" 21E10	Sous " Module d'élasticité ", taper le module d'Young du matériau, 21.10 ¹⁰ N/m ²
"Coefficient de Poisson" 0,28	Sous " Coefficient de Poisson ", taper le coefficient de Poisson de 0,28.
"OK" "OK"	

Enregistrement du fichier

	"Fichier:Enregistrer"	
---	-----------------------	--

II. Calcul

"Analyse"	Dans le menu principal, cliquer sur le bouton "Analyse".
"Exécuter la simulation"	Cliquer sur le bouton "Exécuter la simulation/avec SIMMECH" pour lancer le calcul. Dans la fenêtre « Simulation Job Manager », désactiver "Oui, je souhaite participer au programme", OK puis fermer la fenêtre.
"Résultats"	La fenêtre « Résultats » s'affiche dès la fin du calcul.

III. Résultats

"Résultats"	Les résultats sont visibles en cliquant sur l'onglet Résultats, toujours dans la fenêtre à gauche.
--------------------	--

Affichage des résultats

"Options des résultats"	Cliquer sur « Options des résultats » du menu principal
"Charges et contraintes"	Cliquer sur « Charges et contraintes » pour visualiser sur la poutre les 2 liaisons et la force appliquée.

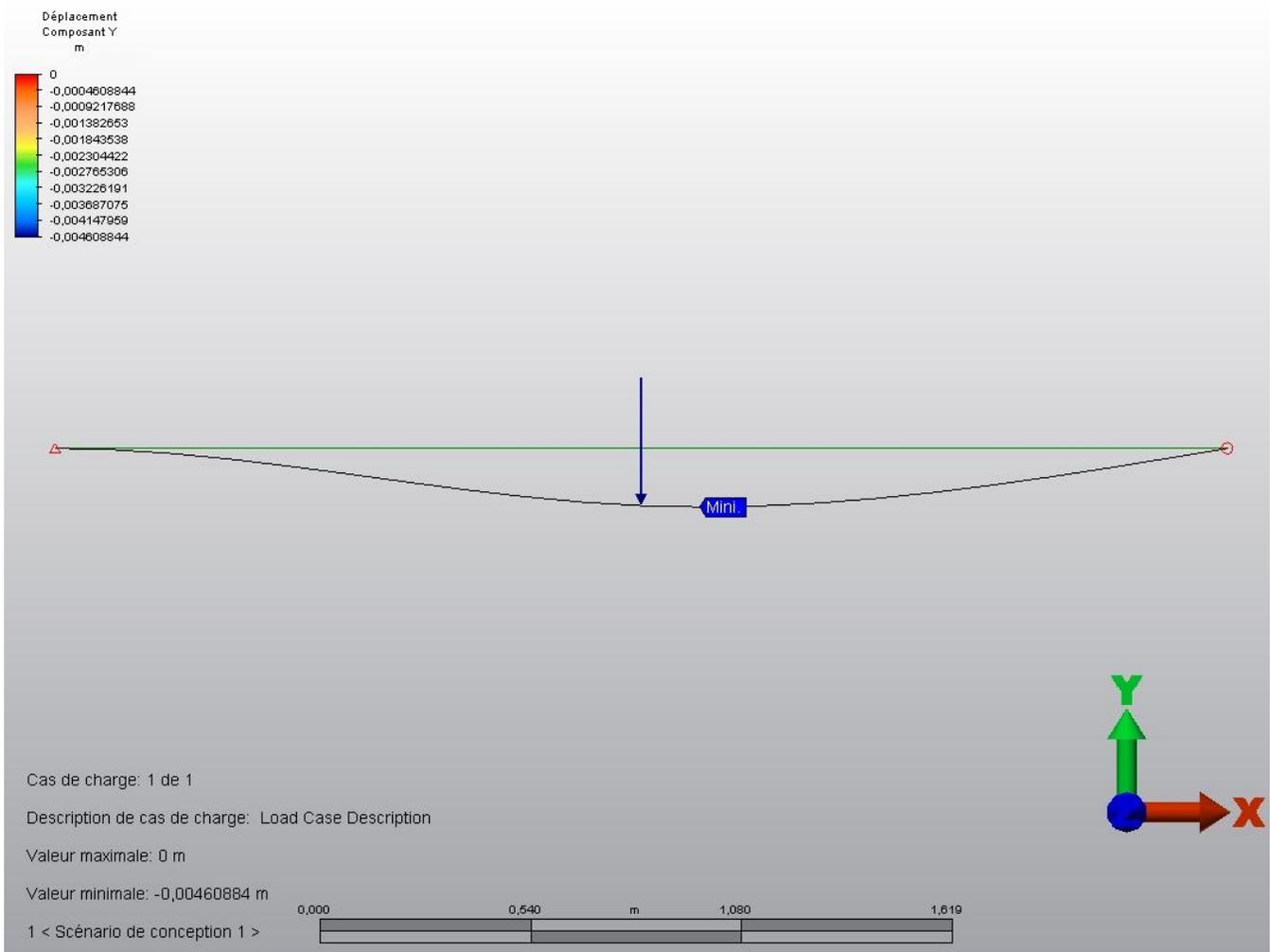
Visualisation des déplacements

"Contours des résultats"	Cliquer sur « Contours des résultats » du menu principal
"Déplacement" "Y"	Cliquer sur « Déplacements » puis « Y » pour visualiser la déformée de la poutre.
"Affich. mod. Déplacés" "Options de modèle déplacé" "Maillage"	Dans « Affich. mod. Déplacés » puis « Options de modèle déplacé », cliquer sur Maillage pour visualiser la poutre non déformée.
"Sélection/Sélectionner/ Nœuds" "Interroger les résultats" par un click droit"	A l'aide de la souris, vous pouvez déterminer les déplacements suivant x, y et z des différents nœuds de la poutre. Il suffit de sélectionner un nœud, de faire un click droit et de sélectionner « Interroger les résultats »
"Mini et Maxi" par la rubrique "Contrôles" dans "Interroger les résultats"	Repérer le nœud où le déplacement est maximum en valeur absolue. Noter les coordonnées de ce nœud et son déplacement maximum. Relever le déplacement du milieu de la poutre.
"Contours des résultats" puis démarrer dans "Captures"	Démarrer l'animation, dans « Options des résultats », à la rubrique « Captures », en cliquant sur l'icône démarrer.

Visualisation des diagrammes de Ty et Mfz

"Afficher/Apparence Style visuel Ligne caractéristique" "Affich. mod. Déplacés/Options"	A partir de « Afficher » du menu principal, retrouver la poutre initiale représentée par sa ligne moyenne. A partir de « Contours des résultats », désactiver l'affichage du modèle déformé (Affich. mod. Déplacés/Options, désactiver « Afficher le modèle déplacé »).
--	--

"Sélection" "Sélectionner" "Eléments" Ctrl A	Pour visualiser ou supprimer les diagrammes, il faut sélectionner les éléments du maillage. Dans « Sélection », choisir « Sélectionner » puis « Elements ». Sélectionner tous les éléments de la poutre avec « Ctrl A »
"Interroger les résultats" "Graphiques" "Diagrammes de cisaillement (axe 2)"	Dans le menu « Interroger les résultats » puis « Graphiques », cliquer sur « Diagrammes de cisaillement (axe 2) ». Supprimer ce diagramme dans le même menu (« supprimer les diagrammes »).
"Interroger les résultats" "Graphiques" "Diagrammes des moments (axe 3)"	Dans le menu « Interroger les résultats » puis « Graphiques », cliquer sur « Diagrammes des moments (axe 3) ». Supprimer ce diagramme dans le même menu (« supprimer les diagrammes »).

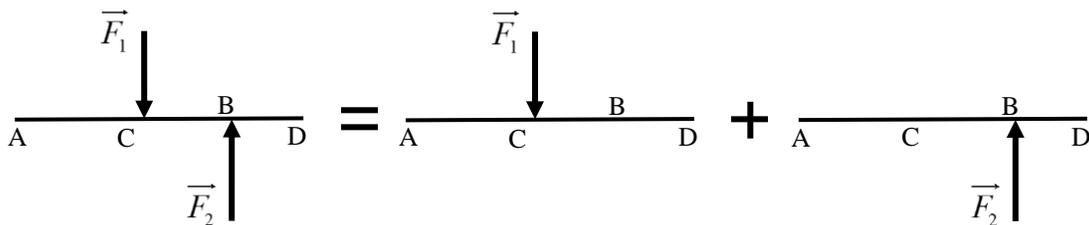


Questions

- 1- Comparer le déplacement suivant y du point C, milieu de la poutre, obtenu par le logiciel avec le résultat théorique.
- 2- Avec le logiciel Autodesk Simulation Mechanical, vérifier le théorème de superposition au point C.

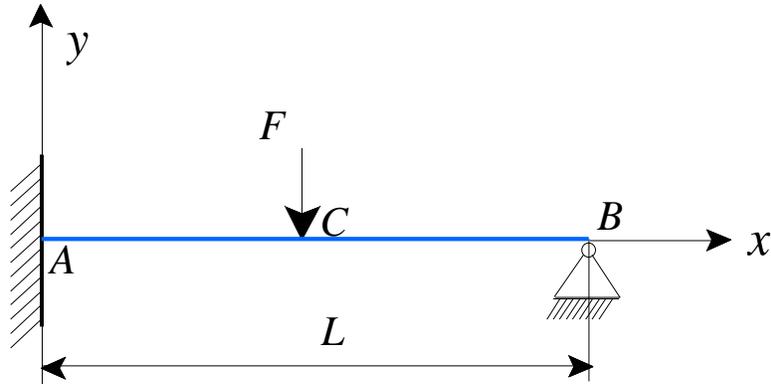
Le cas n°2 a été modélisé ; il suffit de rajouter une force verticale F_2 quelconque pour réaliser le cas n°1 puis de modéliser le cas n°3 avec le chargement F_2 seul.

Pour chaque configuration, il faudra relever le déplacement vertical du point C, milieu de la poutre. Puis vérifier par le calcul la relation ci-dessous.



$$\begin{array}{lclclcl}
 \text{Cas n°1} & = & \text{Cas n°2} & + & \text{Cas n°3} \\
 Y_{C_1} & = & Y_{C_2} & + & Y_{C_3}
 \end{array}$$

Calcul théorique



- Poutre de longueur L, de module d'Young E, de moment quadratique I
- Force F appliquée en C, milieu de [AB]

On montre, par la méthode énergétique, que :

$$\vec{R}_A = \frac{11F}{16} \vec{y} \quad \vec{R}_B = \frac{5F}{16} \vec{y} \quad \vec{M}_A = \frac{3FL}{16} \vec{z}$$

- 1- Déterminer les équations des efforts tranchants T_y et des moments fléchissants M_{f_z} .
- 2- Montrer que le moment fléchissant M_{f_z} s'écrit :

- Sur [AC] : $M_{f_z} = \frac{F}{16}(11x - 3L)$
- Sur [CB] : $M_{f_z} = \frac{5F}{16}(L - x)$

- 3- En utilisant la méthode énergétique, montrer que : $\delta_c = \frac{7FL^3}{768EI}$

Faire l'application numérique

Comparer avec le résultat donné par le logiciel

2^{ème} modèle : poutre modélisée dans le plan

On se propose de modéliser une poutre entièrement sans utiliser la ligne neutre de la poutre. Pour cela, nous allons construire un rectangle de longueur $L=6$ m et de hauteur $h=50$ cm puis le mailler en éléments quadrilatère d'épaisseur $b=30$ cm. On appliquera une charge ponctuelle d'intensité $F = 200000$ newtons appliquée en son milieu. Afin de rendre le problème symétrique et ainsi faciliter l'analyse des contraintes, la poutre est encastree aux deux extrémités (à gauche et à droite). L'objectif de ce 2^{ème} modèle sera de visualiser la répartition des contraintes dans le plan xy et de la commenter en donnant des explications liées à la théorie.

I. Modélisation

Création d'un nouveau modèle

- Créer un nouveau modèle
- L'enregistrer sous « Tp12 »
- Choisir le système d'unité « Metric mks (SI) »

Construction du rectangle

Pour ce modèle, nous allons utiliser des éléments 2D et donc travailler dans un unique plan. Cette configuration 2D nécessite de construire le rectangle dans le plan YZ, plan imposé par le logiciel pour les cas 2D.

"Plans" "Plane 2 < YZ (+X) >" "Esquisse"	Dans la fenêtre « Arborescence » de l'éditeur MEF à la rubrique « Plans », faire un click droit sur « Plane 2 < YZ (+X) » et sélectionner « Esquisse ». Cette opération permet de définir le plan de l'esquisse.
"Dessiner" "Rectangle..."	Dans le menu "Dessiner", sélectionner "Rectangle". Construire le rectangle défini par 2 sommets de la diagonale $A(0 ; 0 ; 0)$ et $B(0 ; 6 ; 0,5)$. Saisir les coordonnées et valider avec Enter au clavier. Attention, c'est dans le repère YZ que le rectangle est créé.

Maillage du rectangle

<p>"1 < YZ (+X) >" "Générer un maillage 2D" "Appliquer"</p>	<p>Dans la fenêtre « Editeur MEF » à la rubrique « Composants », faire un click droit sur « 1 < YZ (+X) > » et sélectionner « Générer un maillage 2D ».</p> <p>Une fenêtre s'ouvre permettant de choisir le maillage (type d'éléments, densité...° Garder les valeurs par défaut et cliquer sur « Appliquer ».</p>
--	--

Paramètres des éléments du maillage

Pour chaque élément du maillage, il faut définir :

- le type d'élément (2D)
- la définition de l'élément (dont l'épaisseur)
- les caractéristiques mécaniques du matériau

<p>"Type d'élément" "2D"</p>	<p>Dans « Composant 1 », faire un click droit sur « Type d'élément ». Cliquer sur l'option "2D".</p>
<p>"Définition de l'élément" "Modifier la définition ..." "0,3" "OK"</p>	<p>Dans « Composant 1 », faire un click droit sur « Définition de l'élément », puis Cliquer sur l'option « Modifier la définition d'un élément ».</p> <p>Définir l'épaisseur de la poutre « 0,3 m »</p>
<p>"Matériaux" "Modifier le matériau" "Modifier les propriétés" "OK"</p>	<p>Dans « Composant 1 », faire un click droit sur « Matériau »</p> <p>Cliquer sur l'option « Modifier le matériau » puis « Modifier les propriétés ».</p> <p>Module d'Young du matériau : $21 \cdot 10^{10}$ N/m² (21E10) Coefficient de Poisson : 0,28</p>

Définition des liaisons et du chargement

Encastremets à $y = 0$ et $y = 6$

<p>"Sélection" "Forme: Rectangle"</p>	<p>Pour sélectionner plusieurs nœuds en même temps, activer « Forme : Rectangle » dans « Sélection ».</p>
<p>"Sélection" "Sélectionner: Sommets"</p>	<p>Pour sélectionner un nœud, activer « Sélectionner : Sommets » dans le menu « Sélection ».</p>
<p>"Ajouter : Contrainte générale" "Fixe" "OK"</p>	<p>Sélectionner tous les nœuds du coté gauche du rectangle à $y=0$ puis par un click droit, sélectionner « Ajouter » puis « Contrainte générale ». Sélectionner « Fixe » puis « OK » dans la fenêtre « Prédéfini » pour définir l'encastrement.</p> <p>Même opération pour le coté droit du rectangle à $y = 6$</p>

Chargement

Sélectionner le milieu de la poutre "Ajouter : Force Nodale"	Sélectionner le point (0 ;3 ;0) puis par un click droit, sélectionner « Ajouter : Force Nodale ».
"Magnitude : -200000"	Taper -200000 dans "Magnitude".
"Direction Z"	Cliquer sur la direction Z.
"OK" "Afficher:Inclure"	

Enregistrement du fichier

	"Fichier:Enregistrer"	
---	------------------------------	--

II. Calcul

"Analyse"	Dans le menu principal, cliquer sur le bouton "Analyse".
"Exécuter la simulation"	Cliquer sur "Exécuter la simulation" pour lancer le calcul.
"Résultats"	La fenêtre « Résultats » s'affiche dès la fin du calcul.

III. Résultats

Visualisation des contraintes et déplacements

"Contours des résultats"	Cliquer sur « Contours des résultats » du menu principal
"Contraintes" "Von Mises"	Cliquer sur « Contraintes » puis sur « Von Mises ».
"Contraintes" "Tenseur des contraintes"	Cliquer sur « Contraintes » puis sur « Tenseur des contraintes » et visualiser les différentes composantes de la matrice des contraintes. Attention au repère utilisé par le logiciel qui n'est pas celui que nous avons l'habitude d'utiliser en cours.
"Déplacements" "Z"	Cliquer sur « Déplacements » puis « Z ». pour visualiser la déformée de la poutre. Relever le déplacement maximum
"Contrôles" "Mini et Maxi" "Animation"	Pour les contraintes et déplacements, vous pouvez repérer les zones où les valeurs sont minimum et maximum à l'aide de la sonde et démarrer l'animation (voir TP11).

Questions

1- Vérifier, en relevant leurs déplacements ou en visualisant le maillage déformé, que les nœuds correspondants à une même section droite reste alignés après déformation (c'est-à-dire que la section correspondante reste plane comme le veut l'hypothèse de Navier-Bernoulli).

2- Examen des contraintes :

- Visualiser les contraintes de Von Mises. Quelles sont les zones critiques ?
- Examiner les composantes du tenseur des contraintes, en particulier les composantes YY et YZ.
- Commenter la répartition des contraintes.
- Que représentent ces deux composantes. Rapprocher les valeurs obtenues avec celles que prévoit la RdM.

Aide :

- ✓ Attention aux repères : le repère utilisé en cours (axe x perpendiculaire à la section droite) et celui du logiciel (axe Y perpendiculaire à la section droite) sont différents
- ✓ Formules des contraintes :
 - Tracer sur papier les diagrammes des efforts intérieurs (effort tranchant et moment fléchissant), sachant que $Y_A = Y_B = F/2$ et $M_A = -M_B = FL/8$
 - Donner les relations théoriques (vues en cours) des contraintes en rapport avec la sollicitation de flexion plane
- ✓ Expliquer la répartition des contraintes obtenues avec le logiciel en utilisant ces formules théoriques
- ✓ Calculer les contraintes théoriques maximales et les comparer avec celles obtenues avec le logiciel

3- Examen des déplacements :

- Comparer le déplacement du milieu de la poutre obtenu avec le logiciel et celui obtenu par le calcul théorique, en tenant compte de l'effort tranchant,

$$\delta = \delta_{M_{fz}} + \delta_{T_y} = \frac{FL^3}{192EI} + \frac{FL}{4Gk_yS}$$

