

FORMA02 - Travaux pratiques de la formation « Initiation » : tuyau coudé sous sollicitation thermo-mécanique et dynamique

Résumé :

Ce test correspond aux travaux pratiques de la formation de base à l'utilisation de *Code_Aster*. Il s'agit d'une tuyauterie coudée, constituée d'un matériau élastique linéaire, soumise à divers chargements : pression interne, transitoire thermique, force transitoire.

Les modélisations utilisées sont les suivantes :

- modélisation A : modélisation 3D, calcul thermo-mécanique,
- modélisation B : modélisation 3D, calcul dynamique, modal puis transitoire,
- modélisation C : éléments `coques` `DKT`, calcul mécanique sous chargement de pression interne,
- modélisation D : éléments poutres (`POU_D_T`), calcul dynamique.

Le chapitre 1 « Problème de référence » présente le problème à traiter et les données communes à toutes les modélisations ; les énoncés des Travaux Pratiques de la formation sont inclus dans ce document :

- TP2 : « 3D thermo-élastique » voir la modélisation A,
- TP2 : « 3D dynamique » voir la modélisation B.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

L'étude concerne une tuyauterie comprenant deux tuyaux droits et un coude [Figure 1.1-a].

Les données géométriques du problème sont les suivantes :

- la longueur L_G des deux tuyaux droits est de 3 m ,
- le rayon R_C du coude est de 0.6 m ,
- l'angle θ du coude est de 90° ,
- l'épaisseur e des tuyaux droits et du coude est de 0.02 m ,
- et le rayon extérieur R_e des tuyaux droits et du coude est de 0.2 m .

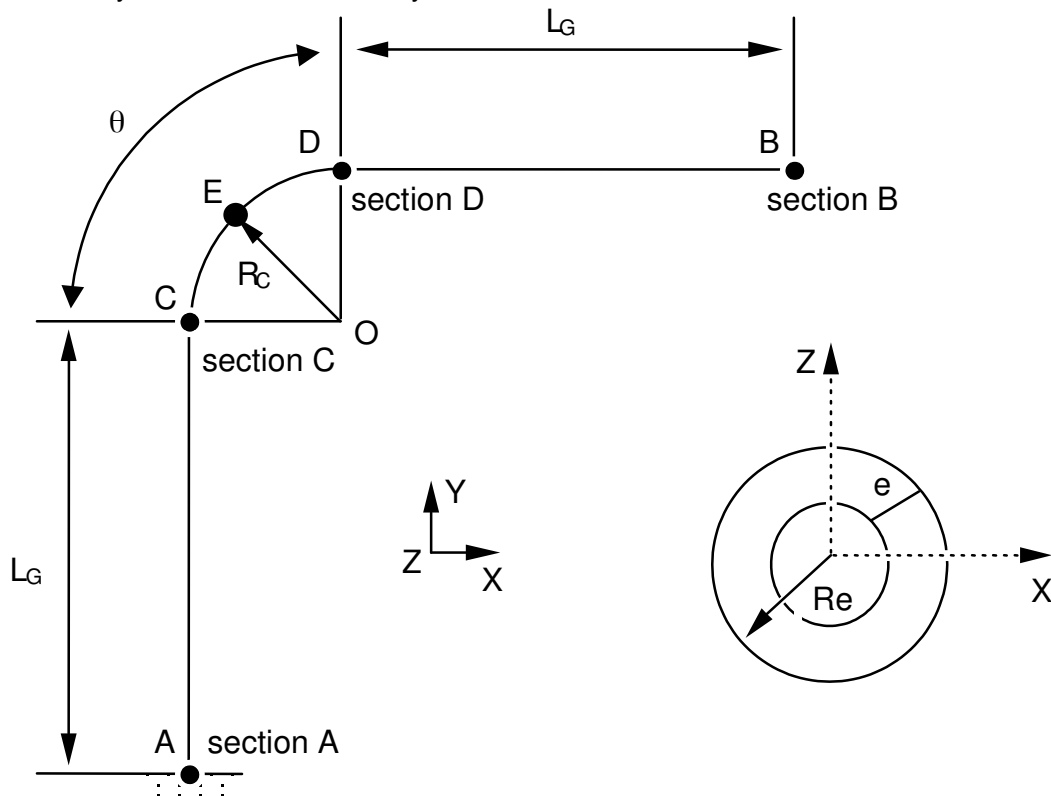


Figure 1.1-a

Remarque :

La géométrie du problème présente une symétrie par rapport au plan (A, X, Y) .

1.2 Propriétés de matériaux

Pour toutes les modélisations :

Matériau élastique linéaire isotrope. les propriétés du matériau sont celles de l'acier *A42* à 20°C :

- le module d'Young $E = 204\,000 \cdot 10^6\text{ N/m}^2$,
- le coefficient de Poisson $\nu = 0.3$.

Pour le calcul thermo-élastique (modélisation A) :

- le coefficient de dilatation thermique $\alpha = 10.92 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$,
- la conduction thermique $\lambda = 54.6\text{ W/m}^\circ\text{C}$,
- la chaleur volumique $\rho C_p = 3.71 \cdot 10^6\text{ J/m}^3^\circ\text{C}$,

Pour le calcul dynamique (modélisations B, D) :

- la masse volumique $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$,
- l'amortissement des modes propres sera pris à 5% pour les modes.

1.3 Conditions aux limites et chargements

Les conditions aux limites pour toutes les modélisations sont les suivantes :

- il y a un encastrement au niveau de la section A ,
- pour les chargements statiques, il y a encastrement au niveau de la section A et de la section B .

En ce qui concerne les calculs statiques, les chargements appliqués sont de trois types :

- pression interne $P = 15 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ (modélisation coques ou 3D),
- chargement thermo-mécanique avec un transitoire de température imposée sur la face interne de la tuyauterie (montée de 20°C à 70°C en 10s) et une condition d'échange nul sur la face externe de la tuyauterie (calorifuge) (modélisation A uniquement).

En ce qui concerne le calcul dynamique, le chargement appliqué est une force transitoire (en Newton) :

$$F_Y(t) = 10\,000\,000 \cdot \sin(2\pi \text{Freq1} \cdot t) \text{ dirigée selon l'axe } Y \text{ et appliquée sur la section } B,$$
$$\text{Freq1 telle que } \omega = 2\pi \text{Freq1} = 121 \text{ rad/s}.$$

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

La solution de référence est obtenue numériquement, il s'agit donc uniquement des tests de non régression.

2.2 Résultats des différentes modélisations :

2.2.1 Calcul statique

Les valeurs testées sont :

- pour le chargement de pression (modélisations A et C), le déplacement en sortie supérieure de coude,
- pour le chargement thermo-mécanique (modélisation A), la température en paroi interne au pied du tube (70°C) ainsi que la contrainte Von Mises maximale de l'ordre de 200 MPa.

2.2.2 Calcul dynamique

Les valeurs testées sont :

- Pour la modélisation 3D (modélisation B), la première fréquence propre de l'ordre de 9 Hz et les déplacements en sortie supérieure de coude,
- pour la modélisation 1D (modélisation D), les contraintes équivalentes en pied de tube.

3 Modélisation A

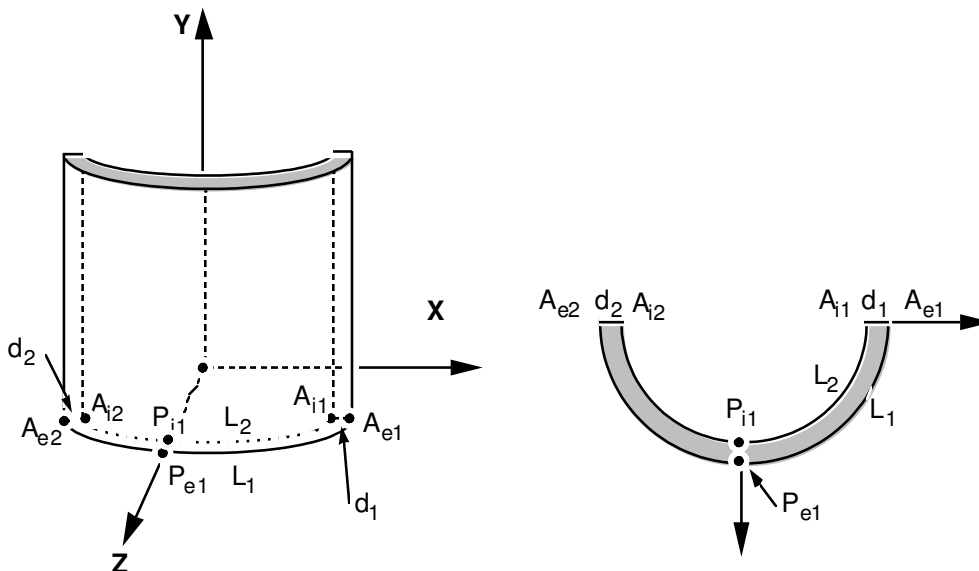
3.1 Caractéristiques de la modélisation

Glossaire : dans Salomé on désigne par :

- vertex les points utiles à la construction de la géométrie ;
- edge les lignes (droites) ;
- arc les arcs de cercles ;
- wire les lignes composées de edge et arc ;
- face les surfaces délimitées par un wire ;
- shell un ensemble de face destiné à être maillé ou délimitant un volume ;
- compound un ensemble d'entités géométriques.

Les tuyaux droits et le coude sont modélisés par des éléments massifs isoparamétriques quadratiques.

La tuyauterie présente un plan de symétrie $Z=0$. On ne maille qu'un demi volume.



3.2 Géométrie

Lancer le module Geometry de la plate-forme Salome-Meca.

Deux procédés pour créer la géométrie :

- Extrusion d'une surface de base selon un chemin :
 1. Création des points A_{e1} , A_{i1} , A_{e2} , A_{i2} , P_{e1} , P_{i1} , puis des arcs de cercle $L1$ et $L2$, des segments $d1$ et $d2$ (Menu New Entity → Basic → ...).
 2. Création du contour (wire) et de la surface (objet de type " Face ") délimitée par $L1$, $d1$, $L2$, $d2$ (Menu New Entity → Build → ...).
 3. Création du chemin filaire : les points A, C, D, B , puis les deux droites AC et DB , et l'arc de cercle CD .
 4. Cette surface est ensuite extrudée par le menu New Entity → Generation → Extrusion Along Path.
- Utilisation d'objets volumiques de base :
 1. Construire un tuyau droit d'axe Z , à l'aide de deux cylindres élémentaires de hauteur 3 et de rayons 0.2 et 0.18 (Menu New Entity → Primitives → Cylinder), et

- d'une opération booléenne (Menu Operations → Boolean → Cut). Renommer l'objet créé en *TUY1* .
2. Appliquer une rotation à *TUY1* autour de *X* pour qu'il soit d'axe *Y* (Menu Operations → Transformation → Rotation).
 3. Sélectionner la face supérieure (en créant par exemple un groupe – Menu New Entity → Group → Create Group), et générer le coude par le menu New Entity → Generation → Revolution. Il faut pour cela créer l'axe de révolution de direction *Z* passant par le point $(0.6, 3, 0)$.
 4. Puis créer de la même façon le second tuyau droit *TUY2* .
 5. Il reste à sélectionner la moitié de la tuyauterie située dans le plan $Z > 0$. Pour cela on peut couper à l'aide d'un outil "Box" (Menu New Entity → Primitives → Box), ou de la partition (Menu Operations → Partition) après avoir créé un plan (Menu New Entity → Basic → Plane), et créer un "compound" en sélectionnant la partie située en $Z > 0$ (Menu New Entity → Build → Compound).

Préparation de la géométrie pour un maillage en hexaèdres :

Le tuyau est destiné à être maillé avec des hexaèdres, c'est à dire de façon réglée (le nombre d'éléments est identique sur deux côté opposés). Avant de procéder au maillage, il est nécessaire de vérifier que la géométrie est topologiquement équivalente à un hexaèdre (6 faces). Pour cela, il faut utiliser le menu Inspection → Check Compound of Blocks.

Selon le mode de construction, il peut être nécessaire de réaliser une partition par des plans des sections entrée et sortie de coude afin d'obtenir une géométrie topologiquement équivalente à un hexaèdre (6 faces). Si on veut faire un maillage avec des tétraèdres, cette condition n'est pas nécessaire. En revanche, si on veut mailler en hexaèdre, c'est indispensable pour les algorithmes des mailleurs.

Création des groupes :

On créera ensuite les groupes de faces où on désire mettre des conditions limites : Base, Symetrie, Efond, Surfint et Surfext (Menu New Entity → Group → Create Group).

On créera aussi le groupe de bord avec une arête de l'épaisseur (*dI*) et un autre groupe de bord avec une arête de circonférence (*LI*) pour permettre un raffinement différent sur ces bords .

On pourra tester l'autre mode d'utilisation de module Geometry /Mesh, consistant à produire, éventuellement modifier, et relire un fichier python, qui contient toutes les instructions nécessaires à la construction de la géométrie. On crée ce fichier par le menu File → Dump Study. Ce fichier python peut être relu par le menu File → Load Script. Ceci permet en particulier de modifier les dimensions de la géométrie. À titre d'exemple, on pourra examiner le contenu du fichier forma02a.datg, et le relire dans Salome-Meca.

3.3 Maillage

Lancer le module Mesh de la plate-forme Salome-Meca.

Le maillage est défini par le menu Mesh → Create Mesh. Sélectionner la géométrie à mailler, puis l'algorithme et l'hypothèse de discrétisation par dimension :

- 3D Hexa h edron (*i, j, k*) .
- 2D Quadrangle .
- 1D Wire Discretisation avec l'hypothèse de 15 segments par edge .

Pour permettre un raffinement différent selon les edges, on créera des sous-maillages par le menu Mesh → Create Sub-mesh :

- Un sub-mesh définissant le nombre de segments dans l'épaisseur, par exemple 2 segments sur *dI* et l'hypothèse supplémentaire « Propagation of 1D hypothese on Opposite Edges ».

- Un sub-mesh définissant le nombre de segments sur la circonférence, par exemple 10 segments sur $L1$ et l'hypothèse supplémentaire « Propagation of 1D hypothese on Opposite Edges ».

Puis calculer le maillage (Menu Mesh → Compute).

Créer les groupes de mailles correspondants aux groupes géométriques (Menu Mesh → Create Groups from Geometry).

Exporter le maillage au format MED.

Remarques :

Avec une autre finesse de maillage, il est possible d'obtenir des résultats sensiblement différents. En particulier, pour obtenir une solution correcte, il est souhaitable d'utiliser des éléments quadratiques.

3.4 Création et lancement du cas de calcul (via AsterStudy)

Lancer le module AsterStudy de la plate-forme Salome-Meca.

Puis en colonne gauche, cliquer sur l'onglet Case View.

On définit le fichier de commandes du cas de calcul.

Nota : ajouter des commandes par le menu Commands → Show All.

L'étude nécessite un premier calcul thermique transitoire suivi d'un calcul mécanique.

Les principales étapes pour la création et le lancement du cas de calcul sont les suivantes :

- Lire le maillage au format MED : Commande `LIRE_MAILLAGE`.
- Définir le matériau : Commande `DEFI_MATERIAU`.

Calcul thermique :

- Définir les éléments finis utilisés : Commande `AFFE_MODELE` pour la modélisation en 3D.
- Affecter le matériau : Commande `AFFE_MATERIAU`.
- Affecter les conditions aux limites thermiques et le chargement : Commande `AFFE_CHAR_THER_F` :
 - On a un transitoire de température imposée sur la surface intérieure de la tuyauterie (montée de 20°C à 70°C en 10s avec la commande `DEFI_FONCTION`).
 - On considère que la tuyauterie est calorifugée et on ne spécifie pas de condition sur la surface extérieure (ce qui revient à un flux nul).
- Résoudre le problème thermique linéaire : Commande `THER_LINEAIRE`, en définissant un état initial de température uniforme égal à 20°C (Initial condition (ETAT_INIT)). Le calcul du champ de température s'effectue pour les instants 0,5 et 10s définis par la commande `DEFI_LIST_REEL`.

Calcul thermo-mécanique :

- Définir les éléments finis utilisés : Commande `AFFE_MODELE` pour la modélisation en 3D.
- Affecter le matériau : Commande `AFFE_MATERIAU`. Le résultat du calcul thermique sera appliqué en tant que variable commandant le comportement du matériau mécanique (external state variable assignment (`AFFE_VARC`)).
- Affecter les conditions aux limites mécaniques et le chargement : Commande `AFFE_CHAR_MECA` :
 - La tuyauterie est encastrée à ses deux extrémités et elle présente un plan de symétrie : `Enforce DOF (DDL_IMPO)`.
 - On a une pression en surface interne de 15 MPa : `PRES_REP`.
- Résoudre le problème mécanique statique linéaire : Commande `MECA_STATIQUE` avec le calcul du champ de température défini ci-dessus.
- Calculer le champ : Commande `CALC_CHAMP`.
 - pour le calcul du champ de contraintes par éléments extrapolées aux nœuds : `CONTRAINTE / SIEF_ELNO`.

- pour le calcul du champ de contraintes équivalentes de Von Mises : `CRITERES / SIEQ_ELNO`.
- Imprimer les valeurs maximales du tenseur de contraintes `SIEQ_ELNO` au format `Result (RESULTAT)` et imprimer les champs de température, les déplacements, et les champs de contraintes au format `MED` : Commande `IMPR_RESU`.
- Pour lancer le cas de calcul, en colonne gauche, cliquer sur l'onglet `History View`.

3.5 Post-traitement des résultats

3.5.1 Avec Salomé

Lancer le module `ParaVis` de la plate-forme `Salome-Meca`.

- Ouvrir le fichier de résultats (Menu `File` → `Open Para View File`) contenant la partie « mécanique ». Appliquer le filtre `Merge Blocks` par le menu `Filters`.
- Ouvrir le fichier de résultats contenant la partie « thermique ». Appliquer le filtre `Merge Blocks`.
- Sélectionner des deux objets `Merge Blocks` puis appliquer le filtre `Apprend Attributes`.
- Visualiser le maillage déformé (Menu `Filters` → `Common` → `Warp By Vector`) avec la température et les contraintes aux points de Gauss (Menu `Filters` → `ELGA field To Surface`).

3.5.2 Avec l'explorateur de résultats Stanley

A l'aide de cet explorateur, on pourra tracer :

- la déformée, en sélectionnant le champ `DEPL`,
- les isovalues des contraintes de Von Mises aux nœuds,
- l'évolution de la température en fonction du temps aux points `Pil` et `PeI`.

3.5.3 Avec Aster_Study en ajoutant un stage

Les principales étapes de la **seconde** exécution avec `Aster_Study` seront :

- Extraire les valeurs la composante `SIYY` du champ `SIEF_ELNO` pour un azimuth au niveau de l'entrée de coude pour le cas de charge correspondant à F_y : Commande `MACR_LIGN_COUPE`. L'azimut est défini par le chemin d'extrémités `(0.18,3,0.)` et `(0.2,3,.0.)`.
- Imprimer la table produite au format `XMGRACE` : Commande `IMPR_TABLE`.

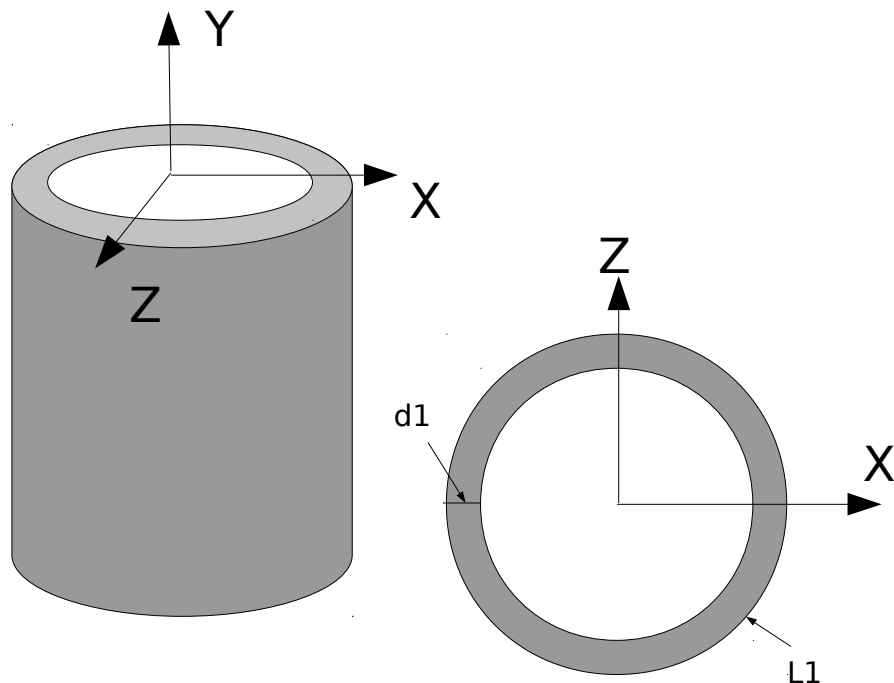
4 Modélisation B

Glossaire : dans Salomé on désigne par :

- vertex les points utiles à la construction de la géométrie ;
- edge les lignes (droites) ;
- arc les arcs de cercles ;
- wire les lignes composées de edge et arc ;
- face les surfaces délimitées par un wire ;
- shell un ensemble de face destiné à être maillé ou délimitant un volume ;
- compound un ensemble d'entités géométriques.

Les tuyaux droits et le coude sont modélisés par des éléments massifs isoparamétriques quadratiques.

La tuyauterie présente un plan de symétrie $Z=0$. Mais contrairement, au cas statique, on n'en profitera pas. On verra en effet, que les modes peuvent sortir du plan de symétrie. On maillera donc tout le volume.



4.1 Géométrie :

Lancer le module Geometry de la plate-forme Salome-Meca.

Deux procédés pour créer la géométrie :

- Extrusion d'une surface de base selon un chemin :
 1. Création des cercles intérieurs et extérieurs de la base (Menu New Entity → Basic → Circle), puis la surface délimitée par les deux cercles (Menu New Entity → Build → Face).
 2. Création du chemin filaire : les points A , C , D , B , puis les deux droites AC et DB , et l'arc de cercle CD (Menu New Entity → Basic → ...), puis le contour (Menu New Entity → Build → Wire).
 3. Cette surface est ensuite extrudée par le menu New Entity → Generation → Extrusion Along Path.
- Utilisation d'objets volumiques de base :

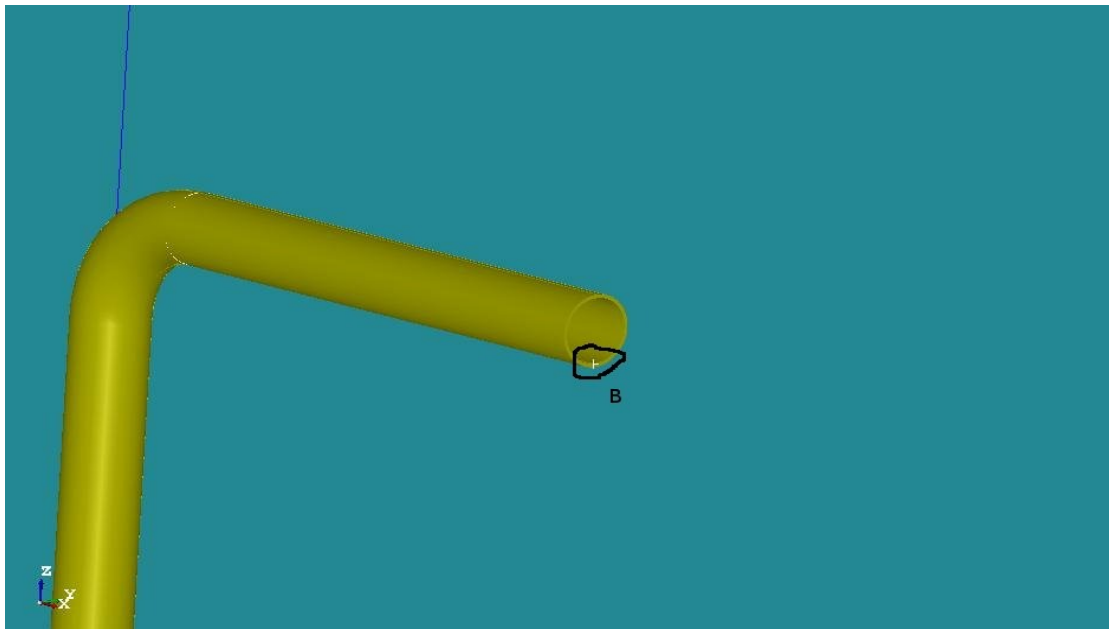
1. Construire un tuyau droit d'axe Z , à l'aide de deux cylindres élémentaires de hauteur 3 et de rayons 0.2 et 0.18 (Menu New Entity → Primitives → Cylinder), et d'une opération booléenne (Menu Operations → Boolean → Cut). Renommer l'objet créé en *TUY1*.
2. Appliquer une rotation à *TUY1* autour de X pour qu'il soit d'axe Y (Menu Operations → Transformation → Rotation).
3. Sélectionner la face supérieure (en créant par exemple un groupe – Menu New Entity → Group → Create Group), et générer le coude par le menu New Entity → Generation → Revolution. Il faut pour cela créer l'axe de révolution de direction Z passant par le point (0.6, 3, 0).
4. Puis créer de la même façon le second tuyau droit *TUY2*.

Préparation de la géométrie pour un maillage en hexaèdres :

Pour un maillage en hexaèdres, il faut utiliser l'algorithme « Hexahedron(i,j,k) » ou bien utiliser l'option « Automatic Hexahedralization ».

Le tuyau est destiné à être maillé avec des hexaèdres, c'est à dire de façon réglée (le nombre d'éléments est identique sur deux côté opposés). Avant de procéder au maillage, il est nécessaire de vérifier que la géométrie est topologiquement équivalente à un hexaèdre (6 faces). Pour cela, il faut utiliser le menu Inspection → Check Compound of Blocks.

Selon le mode de construction, il peut être nécessaire de réaliser une partition par des plans des sections entrée et sortie de coude afin d'obtenir une géométrie topologiquement équivalente à un hexaèdre (6 faces). Si on veut faire un maillage avec des tétraèdres, cette condition n'est pas nécessaire. En revanche, si on veut mailler en hexaèdre, c'est indispensable pour les algorithmes des maillages.



Création des groupes :

On créera ensuite les groupes de faces où on désire mettre des conditions limites : Base ainsi que la section B au bout du tuyau pour appliquer la force dynamique (Menu New Entity → Group → Create Group).

On créera aussi le groupe de bord avec une arête de l'épaisseur (dI) et un autre groupe de bord avec une arête de circonférence (LI) pour permettre un raffinement différent sur ces bords .

Pour le post-traitement il est pratique de créer un groupe sur un point où l'on puisse suivre les évolutions. On créera donc le groupe point B situé sur la section B , en bas, sur la surface intérieure du tuyau.

4.2 Maillage

Lancer le module `Mesh` de la plate-forme Salome-Meca.

Le maillage est défini par le menu `Mesh` → `Create Mesh`. Sélectionner la géométrie à mailler, puis l'algorithme et l'hypothèse de discrétisation par dimension :

- 3D Hexa h edron (i, j, k).
- 2D Quadrangle.
- 1D Wire Discretisation avec l'hypothèse de 15 segments par edge.

Pour permettre un raffinement différent selon les edges, on créera des sous-maillages par le menu `Mesh` → `Create Sub-mesh` :

- Un sub-mesh définissant le nombre de segments dans l'épaisseur, par exemple 2 segments sur $d1$ et l'hypothèse supplémentaire « Propagation of 1D hypothese on Opposite Edges ».
- Un sub-mesh définissant le nombre de segments sur la circonférence, par exemple 10 segments sur $L1$ et l'hypothèse supplémentaire « Propagation of 1D hypothese on Opposite Edges ».

Puis calculer le maillage (Menu `Mesh` → `Compute`).

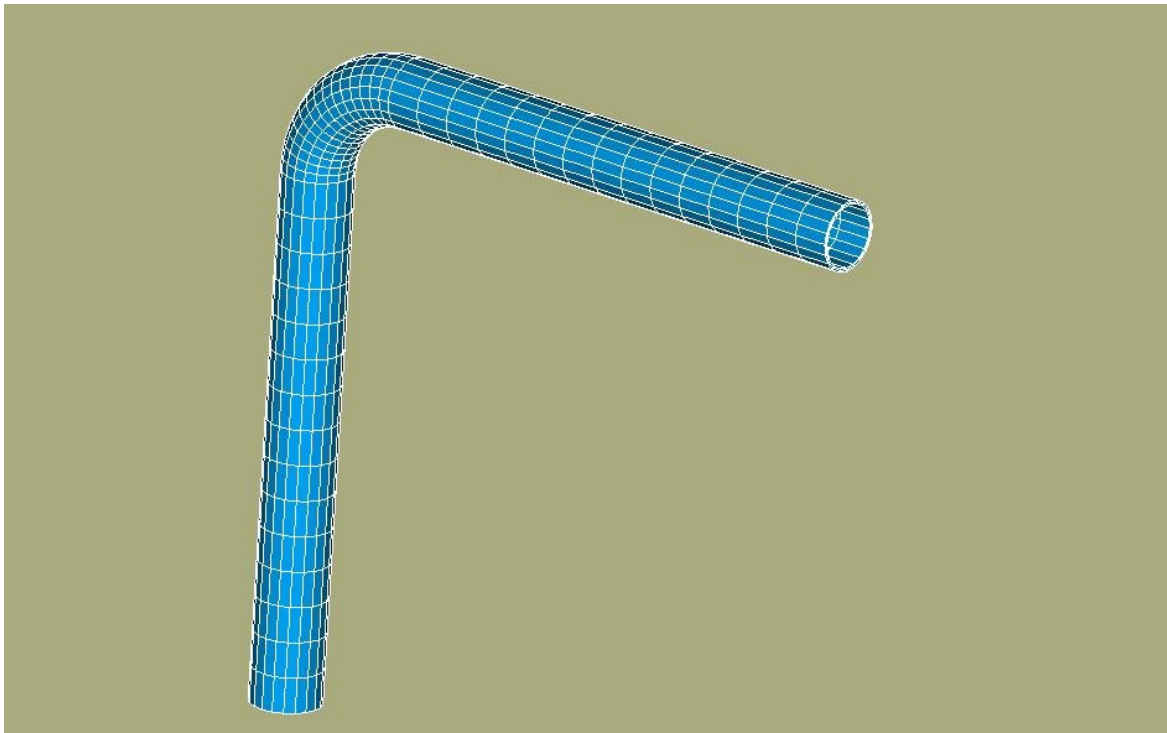
Créer l es groupes d e maill es correspondants aux groupe géométriques (Menu `Mesh` → `Create Groups from Geometry`) .

E xport er le maillage au format `MED` .

Pour obtenir une meilleure précision, on va faire passer le maillage de linéaire à quadratique, grâce à l'outil « Modification -> Convert to/from quadratic ». Les plus curieux peuvent comparer les différences de résultats entre les deux types d'éléments.

Remarques :

Avec une autre finesse de maillage, il est possible d'obtenir des résultats sensiblement différents. En particulier, pour obtenir une solution correcte, il est souhaitable d'utiliser des éléments quadratiques.



4.3 Création et lancement du cas de calcul

Les principales étapes du calcul avec *Code_Aster* seront :

- Préparation des données et analyse modale

On va utiliser le « wizard » pour l'analyse modale. Il suffit d'entrer les données de calcul en suivant les fenêtres affichées. Il ne faut pas oublier de spécifier l'encastrement sur la base. On calculera les cinq premiers modes du tuyau.

On lancera ensuite le calcul dans le module SALOME *Code_Aster*. On pourra visualiser les modes dans SALOME en les « déformant ». On peut aussi les « animer » grâce à la fonction *Sweep*. Elle permet de mieux comprendre la déformée modale.

Dans PARAVIS, cette animation se fait directement via la macro `modes`. On sélectionne le mode à visualiser ensuite dans l'objet `ScaleVector` de l'arbre.

- Analyse transitoire

Pour l'analyse transitoire, on partira du fichier de commande créé par le « wizard » de SALOME. On y ajoutera les commandes nécessaires à la suite de l'analyse.

Construction de la force ponctuelle

- Définition de la charge « force sur la section B » (`AFFE_CHAR_MECA / FORCE_FACE`).
- Calcul des vecteurs forces élémentaires (`CALC_VECT_ELEM`).
- Assemblage du vecteur force (`ASSE_VECTEUR`).
- Définition de la fonction évolution du temps (`FORMULE`).

Transitoire sur base modale

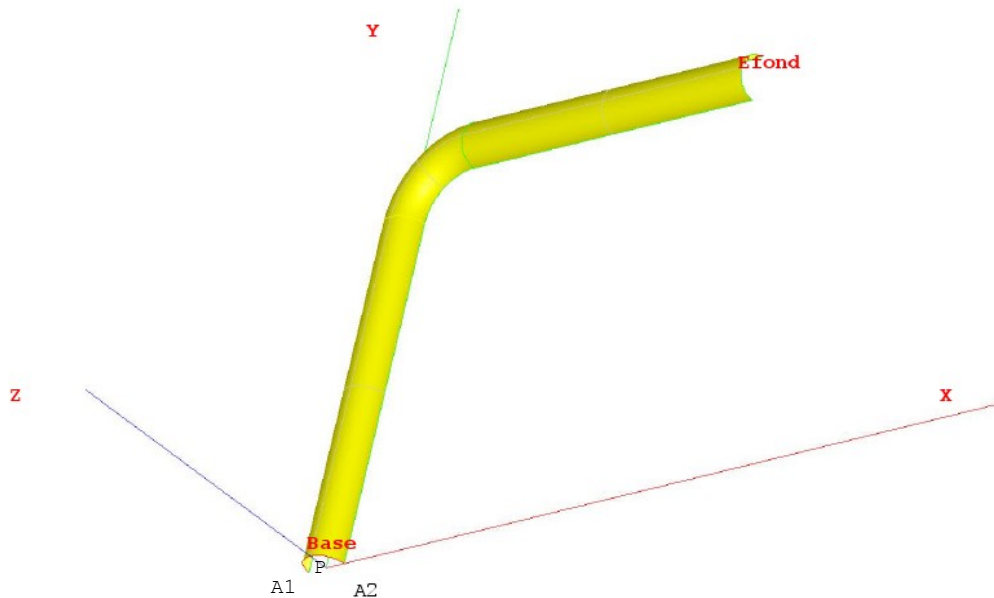
- Projection du problème assemblé sur la base des modes propres (`PROJ_BASE`).
- Calcul transitoire par recombinaison modale (`DYNA_VIBRA (TYPE_CALCUL='TRAN' , BASE_CALCUL='GENE')`).
- Récupération des déplacements en Y au point B (`RECU_FONCTION`).
- Impression de ces fonctions au format TABLEAU (`IMPR_FONCTION`).

4.4 Post-traitement des résultats

On importera dans SALOME le tableau des déplacements en fonction du temps et on fera construire à SALOME la courbe des déplacements au point B .

5 Modélisation C

Dans le cas de la modélisation en éléments coques, le maillage consiste en la discrétisation de la surface moyenne de la tuyauterie. La géométrie étant symétrique par rapport au plan (A, X, Y) , on ne maillera qu'une demi-surface.



5.1 Géométrie

On peut créer cette géométrie en définissant les points $A1$, P et $A2$, puis l'arc de cercle $Base$ (Menu New Entity → Basic → ...).

Il suffit ensuite de créer le premier tuyau droit AC par le menu New Entity → Generation → Extrusion.

Pour créer le coude, il faut récupérer l'extrémité du tuyau AC en appliquant le menu New Entity → Explode, puis générer la géométrie du coude par le menu New Entity → Generation → Revolution.

Enfin, appliquer la même démarche pour le tuyau DB et créer un "compound" en sélectionnant la partie situ PRES=PRES.),

ée en $Z > 0$ (Menu New Entity → Build → Compound).

On créera ensuite les groupes de faces où on désire mettre des conditions limites : Base, Symetrie, EFond et surface du tuyau (Menu New Entity → Group → Create Group).

On créera aussi le groupe point $A1$.

5.2 Maillage

Lancer le module Mesh de la plate-forme Salome-Meca.

Le maillage est défini par le menu Mesh → Create Mesh. Sélectionner la géométrie à mailler, puis l'algorithme et l'hypothèse de discrétisation par dimension :

- 2D Quadrangle.
- 1D Wire Discretisation avec l'hypothèse de 15 segments par edge.

Pour permettre un raffinement différent selon les edges, on créera un sous-maillage (Menu Mesh → Create Sub-mesh) définissant le nombre de segments sur la circonférence, par exemple 10

segments sur *base* et l'hypothèse supplémentaire « Propagation of 1D hypothesis on Opposite Edges ».

Puis calculer le maillage (Menu Mesh → Compute).

Créer les groupes de mailles correspondants aux groupes géométriques (Menu Mesh → Create Groups from Geometry).

Exporter le maillage au format MED .

5.3 Création et lancement du cas de calcul (via AsterStudy)

Lancer le module AsterStudy de la plate-forme Salome-Meca .

Puis en colonne gauche, cliquer sur l'onglet Case View.

On définit le fichier de commandes du cas de calcul.

Nota : ajouter des commandes par le menu Commands → Show All.

L'étude nécessite un premier calcul thermique transitoire suivi d'un calcul mécanique.

Les principales étapes pour la création et le lancement du cas de calcul sont les suivantes :

- Lire le maillage au format MED : Commande `LIRE_MAILLAGE`.
- Définir les éléments finis utilisés : Commande `AFFE_MODELE`. Les tuyaux droits et le coude seront modélisés par des éléments de coque (`DKT`).
- Orienter des normales aux éléments : Commande `MODI_MAILLAGE / ORIE_NORM_COQUE` pour orienter tous les éléments de la même façon, avec une normale tournée vers l'intérieur du tuyau (étant donné la convention de signe sur la pression) afin de donner une valeur positive à la pression (utiliser le groupe `AI`).
- Définir le matériau : Commande `DEFI_MATERIAU`. Les caractéristiques mécaniques sont identiques sur toute la structure.
- Affecter le matériau : Commande `AFFE_MATERIAU`.
- Affecter les caractéristiques des éléments coques : Commande `AFFE_CARA_ELEM / COQUE` pour définir l'épaisseur.
- Affecter les conditions aux limites mécaniques et les chargements : Commande `AFFE_CHAR_MECA` :
 - Il y a un encastrement sur le groupe de mailles *Base* et *Efond* des conditions de symétrie (déplacement normal *DZ* nul et rotations *DRX* et *DRY* nulles) sur le groupe de mailles *Symetrie* : Enforce DOF (`DDL_IMPO`).
 - Une pression interne *P* : `PRES_REP`.
- Résoudre le problème élastique : Commande `MECA_STATIQUE`.
- Imprimer les déplacements et les contraintes au format MED : Commande `IMPR_RESU`. On imprimera sous forme listing le déplacement pour chaque résultat sur la section B.
- Pour lancer le cas de calcul, en colonne gauche, cliquer sur l'onglet `History View`.

6 Modélisation D

6.1 Géométrie

On peut créer la géométrie en définissant les points A, C, D, B , puis les deux droites AC et DB , et l'arc de cercle CD . Ceci peut se faire de plusieurs façons :

- En définissant les coordonnées de chaque point, y compris le point milieu de l'arc CD (Menu `New Entity` → `Basic` → ...);
- De façon plus simple en utilisant l'outil « Sketcher » (Menu `New Entity` → `Basic` → `2D Sketch`).

Après avoir construit l'ensemble de la ligne, il faut définir les groupes sous ce « Wire » : il suffira pour ces travaux pratiques de créer les groupes A, B, AC, CD , et DB (Menu `New Entity` → `Group` → `Create Group`).

6.2 Maillage

Lancer le module `Mesh` de la plate-forme Salome-Meca.

Le maillage est défini par le menu `Mesh` → `Create Mesh`. Sélectionner la géométrie à mailler, puis l'algorithme et l'hypothèse de discrétisation par dimension : `1D Wire Discretisation` avec l'hypothèse de 15 segments par `edge`.

6.3 Création et lancement du cas de calcul (via AsterStudy)

Lancer le module `AsterStudy` de la plate-forme Salome-Meca .
Puis en colonne gauche, cliquer sur l'onglet `Case View`.

On définit le fichier de commandes du cas de calcul.

Nota : ajouter des commandes par le menu `Commands` → `Show All`.

L'étude nécessite un premier calcul thermique transitoire suivi d'un calcul mécanique.

Les principales étapes pour la création et le lancement du cas de calcul sont les suivantes :

- Lire le maillage au format MED : Commande `LIRE_MAILLAGE`.
- Définir les éléments finis utilisés : Commande `AFFE_MODELE`.
- Définir le matériau : Commande `DEFI_MATERIAU`.
- Affecter le matériau : Commande `AFFE_MATERIAU`.
- Affecter les caractéristiques des éléments poutres : Commande `AFFE_CARA_ELEM`.
- Affecter les conditions aux limites mécaniques et le chargement : Commande `AFFE_CHAR_MECA` / `Enforce DOF (DDL_IMPO)`. Le point A est encasté.
- Définir les matrices du problème élastique : Commande `ASSEMBLAGE` / `MASS_MECA` et `RIGI_MECA`.
- Calculer les 5 premiers modes propres : Commande `CALC_MODES`.
- Imprimer les modes propres au format MED : Commande `IMPR_RESU`. On imprimera le maillage et les modes.

Pour lancer le cas de calcul, en colonne gauche, cliquer sur l'onglet `History View`.

Analyse transitoire :

- Construction de la force ponctuelle
 1. Affecter la charge « force au point B » : Commande `AFFE_CHAR_MECA` / `FORCE_NODALE`.
 2. Calculer les vecteurs forces élémentaires : Commande `CALC_VECT_ELEM`.

3. Construire un champ aux nœuds par assemblage du vecteur force :
Commande `ASSE_VECTEUR`.
 4. Définir la fonction évolution du temps : Commande `FORMULE`.
- Transitoire sur base modale
 1. Projection du problème assemblé sur la base des modes propres : Commande `PROJ_BASE`.
 2. Calculer le transitoire par recombinaison modale : Commande `DYNA_VIBRA`.
 3. Extraire les déplacements en Y en B : Commande `RECU_FONCTION`.
 4. Imprimer ces fonctions au format `TABLEAU` : Commande `IMPR_FONCTION`.