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.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 Rc 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 Re des tuyaux droits et du coude est de $0.2\,m$.

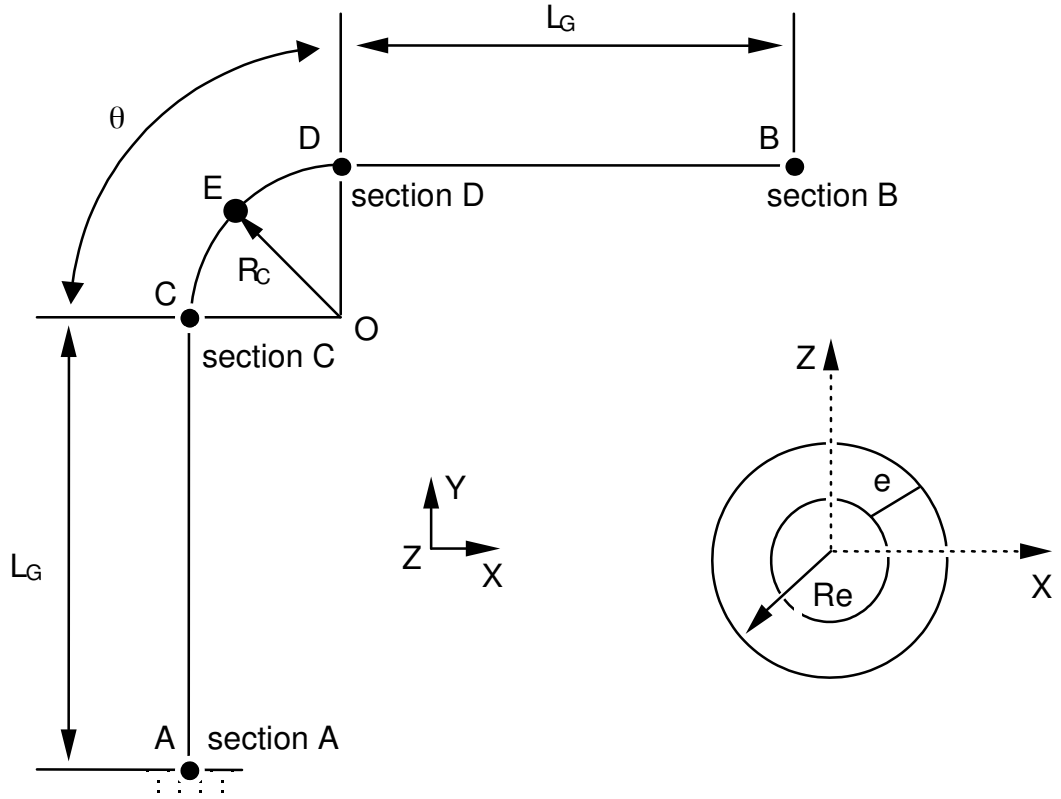


Figure 1.1-a

Remarque :

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

1.2 Propriétés de matériaux

Pour toutes les modélisations A, B, C et D :
Matériau élastique linéaire isotrope. les propriétés du matériau sont celles de l'acier $A42$ à $20\,°C$:

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

Pour le calcul thermo-élastique (modélisation A) :

- le coefficient de dilatation thermique $\alpha = 1.096 \times 10^{-5}/°C$,
- la conduction thermique $\lambda = 54.6\,W/m\,°C$,
- la chaleur volumique $\rho Cp = 3.71 \times 10^{6}\,J/m^3\,°C$,

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Pour le calcul dynamique (modélisations B, D) :
- la masse volumique $\rho = 7800\, kg/m^3$,
- 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 :
- encastrement au niveau de la section A ,
- lors des chargements statiques, 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 (sur la face interne) $P = 15.10^{+6}\, N/m^2$ (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 $10\mathrm{s}$) 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) :
$FY(t) = 10\,000\,000.\sin(2\pi\, Freq1\,.\,t)$ dirigée selon l'axe Y et appliquée sur la section B avec $Freq1 = 20\, Hz$.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

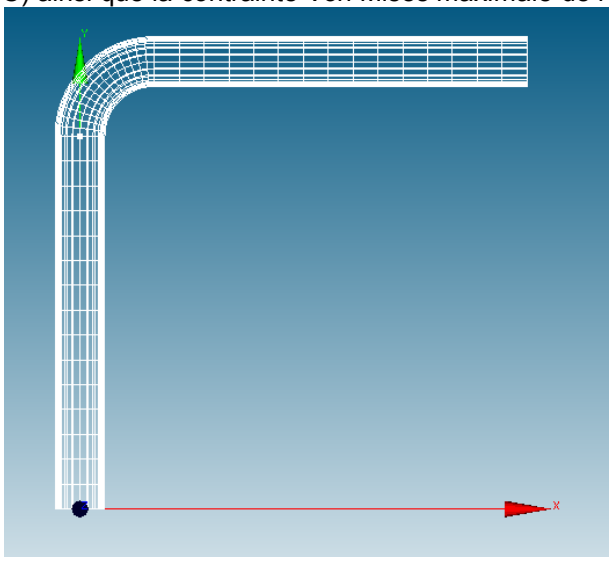
La solution de référence est obtenue numériquement, il s'agit donc uniquement des tests de non régression.

2.2 Résultats des différentes modélisations :

2.2.1 Calcul statique

Les valeurs testées sont :

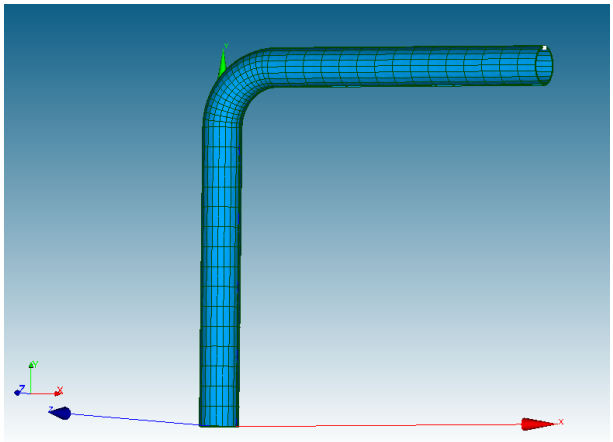
- pour le chargement de pression (modélisations A et C), le déplacement en sortie supérieure de coude à la surface moyenne (comme dans la figure en dessous en blanc, DX à -4.52e-4 m)
- pour le chargement thermo-mécanique (modélisation A), la température en paroi interne au pied du tube (70°C) ainsi que 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 la composante de déplacement DY du point P à l'extrémité de la tuyauterie à la surface moyenne (comme dans la figure en dessous en blanc) de l'ordre de -0.128m à l'instant 1s.
- pour la modélisation 1D (modélisation D), les contraintes équivalentes en pied de tube.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

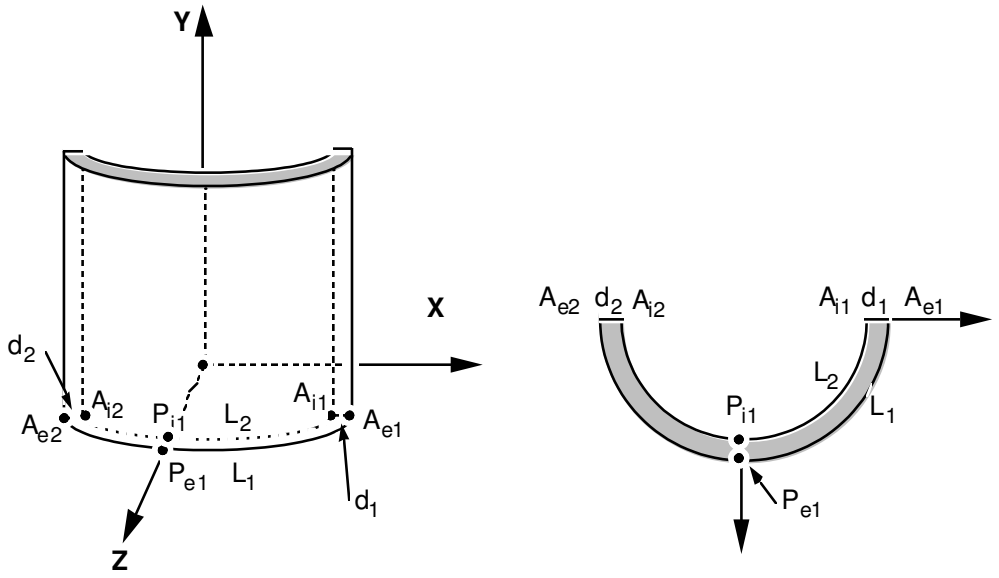
3 Modélisation A

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.

Conditions aux limites et chargement : voir le chapitre 1.3 .



3.2 Géométrie

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

Deux procédés pour créer la géométrie (recommander le deuxème) :
- Extrusion d'une surface de base selon un chemin :
  1. Création des points $Ae1$, $Ai1$, $Ae2$, $Ai2$, $Pe1$, $Pi1$, puis des arcs de cercle $L1$ et $L2$, des segments $d1$ et $d2$ (Menu `New Entity → Basic → Point / arc / Line`).
  2. Création du contour (`wire`) délimitée par $L1$, $d1$, $l2$, $d2$ et puis de la surface (objet de type " `Face` ") à partir de ce contour (Menu `New Entity → Build → wire / Face`).
  3. Création du chemin filaire : les points A, C, D, B, O , puis les deux droites AC et DB , et l'arc de cercle CD , enfin le chemin total $ACDB$ en `wire`.
  4. Cette surface est ensuite extrudée par le menu `New Entity → Generation → Extrusion Along Path`.

- Utilisation d'objets volumiques de base :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1. Construire un tuyau droit d'axe Z (option par défaut), 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`): `Angle = -90°` et désactiver `Create a copy`.
3. Sélectionner la face supérieure en créant un groupe : Menu `New Entity → Group → Create Group`. Cette face permet de générer le coude par le menu `New Entity → Generation → Revolution (Angle = -90°)`. Il faut pour cela créer l'axe de révolution (un vecteur de direction Z passant par le point `O` $(0.6,3.0,0.0)$) : création des points $(0.6,3.0,0.0)$ et $(0.6,3.0,1.0)$ et puis création du vecteur (Menu `New Entity → Basic → Vector`).
4. Puis créer de la même façon le second tuyau droit $TUY2$: sélectionner la face supérieure de la coude en créant un groupe, et générer le tuyau droit par le menu `New Entity → Generation → Extrusion` suivant X.
5. Il reste à sélectionner la moitié de la tuyauterie située dans le plan $Z>0$. Pour cela on peut d'abord créer un plan (Menu `New Entity → Basic → Plane`, par exemple, le 5ème choix de `Plane` (création à partir du system local des coordonnées), avec l'option `OXY` et la taille `8`). Puis couper à l'aide de la partition (Menu `Operations → Partition`) en sélectionnant les 3 parties de la tuyauterie comme `Objects` et le plan comme `Tool Objects`.
6. Créer un groupe de volume en sélectionnant les parties situées en $Z>0$ (Menu `New Entity → Group → Creat Group`)., et enfin avec ce groupe créer un "`compound`" (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 (le 1er procédé), il peut être nécessaire de réaliser une partition par deux plans des sections entrée et sortie de coude afin d'obtenir une géométrie topologiquement équivalente à un hexaèdre (6 faces). Pour créer les deux plans, menu `New Entity → Basic → Plane : point + Vector` donc `C + AC / D + BD`). Pour la partition, menu `Operations → Partition`.

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 ($d1$) et un autre groupe de bord avec une arête de circonférence ($L1$) 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.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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:Mapping.
- 1D Wire Discretisation avec l'hypothèse basique Number of Segments (15 segments par edge).

Puis calculer le maillage (Menu Mesh → Compute).

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 $d1$. Par exemple, l'hypothèse basique Number of Segments avec 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 $L1$. 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 groupe géométriques (Menu Mesh → Create Groups from Geometry) .
Exporter 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.

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, cliquer droite CurrentCase pour ajouter un nouveau stage où on définit des 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 (E, ν, α dans ELAS, $\lambda, \rho Cp$ dans THER).

Calcul thermique :

- Définir les éléments finis utilisés : Commande AFFE_MODELE pour affecter le phénomène THERMIQUE et la modélisation en 3D à TOUT.
- Affecter le matériau à tout : Commande AFFE_MATERIAU.
- Affecter les conditions aux limites thermiques et le chargement :
  - On a un transitoire de température imposée sur la surface interne Surfint de la tuyauterie. Cette montée de $20\,°C$ à $70\,°C$ en $10s$ est définie avec la commande DEFI_FONCTION : définir les données dans VALE et NOM_PARA = INST.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Ce transitoire de température est imposé avec la commande AFFE_CHAR_THER_F : option TEMP_IMPO, avec Surfint comme GROUP_MA, et la fonction définie comme température imposée TEMP)
- 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).

- Définir les instants de calcul, 0 s, 5 s, 10 s : commande DEFI_LIST_REEL .
- Résoudre le problème thermique linéaire : Commande THER_LINEAIRE, en définissant un état initial de température uniforme égal à $20\,°C$ (ETAT_INIT / VALE), et en affectant MODELE, CHAM_MATER (matériaux), EXCIT (chargement), INCREMENT (liste des instants).

Calcul thermo-mécanique :

- Définir les éléments finis utilisés : Commande AFFE_MODELE pour affecter le phénomène MECANIQUE et la modélisation en 3D.
- Affecter le matériau : Commande AFFE_MATERIAU. Le résultat du calcul thermique sera appliqué à tout en tant que variable commandant le comportement du matériau mécanique par EVOL dans l'option AFFE_VARC avec la température de référence NOM_VARC = TEMP à 20°.
- Affecter les conditions aux limites mécaniques et le chargement : Commande AFFE_CHAR_MECA :
  - L a tuyauterie est encastrée à ses deux extrémités et elle présente un plan de symétrie : DDL_IMPO .
  - On a une pression en surface interne de $15\,MPa$: PRES_REP (vérifier la direction de la normal à la surface interne dans AsterStudy).
- Résoudre le problème mécanique statique linéaire : Commande MECA_STATIQUE avec le calcul du champ de température défini ci-dessus et la même liste des instants comme calcul thermique.
- Calculer le champ : Commande CALC_CHAMP avec reuse.
  - 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 le 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 et Results

Visualiser les champs et le maillage déformé avec quelques cliques dans l'onglet Results d'AsterStudy. Vérifier quelques valeurs en comparant avec des références (voir la chapitre 2.2.1).

On peut aussi 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 ». Choisir le champ SIEF_ELGA et puis appliquer le filtre Merge Blocks par le menu Filters .
- Ouvrir le fichier de résultats contenant la partie « thermique ». Choisir le champ TEMP et puis 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).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.5.2 Avec Aster_Study en ajoutant un `stage`

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

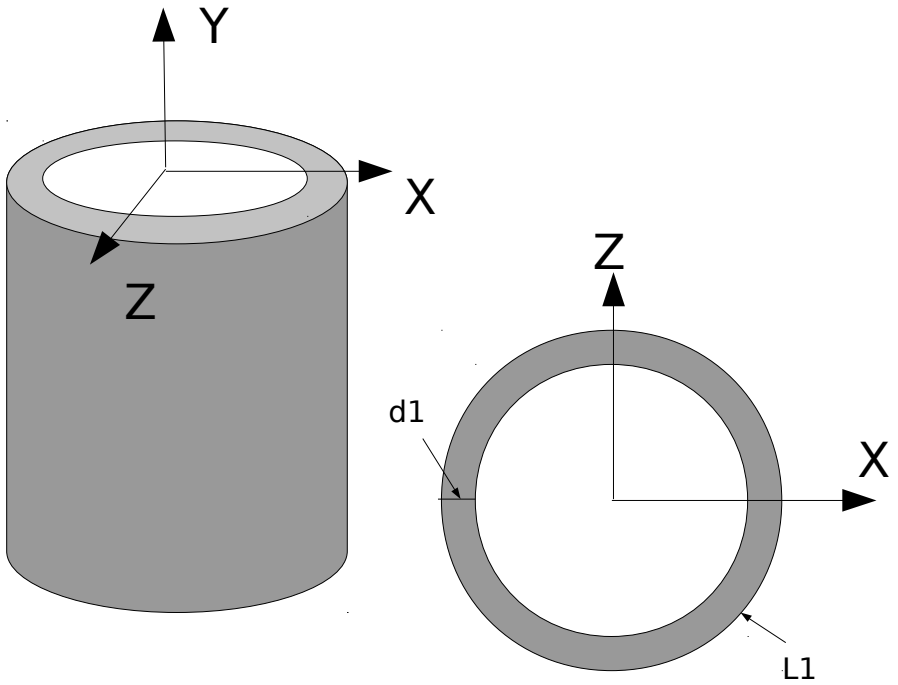
- Extraire les valeurs du champ SIEF_ELNO pour un azimut au niveau de l'entrée de coude (point C) pour le cas de charge correspondant à Fy dans une table : Commande MACR_LIGN_COUPE. Avec l'option de type SEGMENT, l'azimut est défini par le chemin d'extrémités $(0.18,3.0,0.)$ et $(0.2,3.0,0.)$, par exemple avec 10 points.
- Imprimer la table produite au format XMGRACE pour la composante NOM_PARA=SIYY avec la commande IMPR_TABLE : utiliser Filtre → pour l'instant NOM_PARA=INST à 10s, et déterminer les données à extraire par NOM_PARA, par exemple, COOR_X (pour l'abscisse X) et SIYY (pour la composante de contrainte).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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.
Conditions aux limites et chargement : voir le chapitre 1.3.



4.1 Géométrie :

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

Deux procédés pour créer la géométrie (recommander le deuxème) :
- Extrusion d'une surface de base selon un chemin :
  1. Création des cercles intérieurs et extérieurs de la base sur le plan `OXZ` (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, O, puis les deux droites AC et DB, et l'arc de cercle CD (Menu `New Entity → Basic → Point / Line / Arc`), puis le chemin entirer (Menu `New Entity → Build → Wire`).
  3. Cette surface est ensuite extrudée par le menu `New Entity → Generation → Extrusion Along Path`.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- 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`) : `Angle = -90°` et désactiver `Create a copy`.
  3. Sélectionner la face supérieure en créant un groupe : Menu `New Entity → Group → Create Group`. Cette face permet de générer le coude par le menu `New Entity → Generation → Revolution (Angle = -90°)`. Il faut pour cela créer l'axe de révolution (un vecteur de direction Z passant par le point `O` $(0.6,3.0,0.0)$) : création des points $(0.6,3.0,0.0)$ et $(0.6,3.0,1.0)$ et puis création du vecteur (Menu `New Entity → Basic → Vector`).
  4. Puis créer de la même façon le second tuyau droit $TUY2$: sélectionner la face supérieure de la coude en créant un groupe, et générer le tuyau droit par le menu `New Entity → Generation → Extrusion` suivant X.
  5. Enfin assembler les 3 parties de la tuyauterie à l'aide de la partition (Menu `Operations → Partition`).

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`.

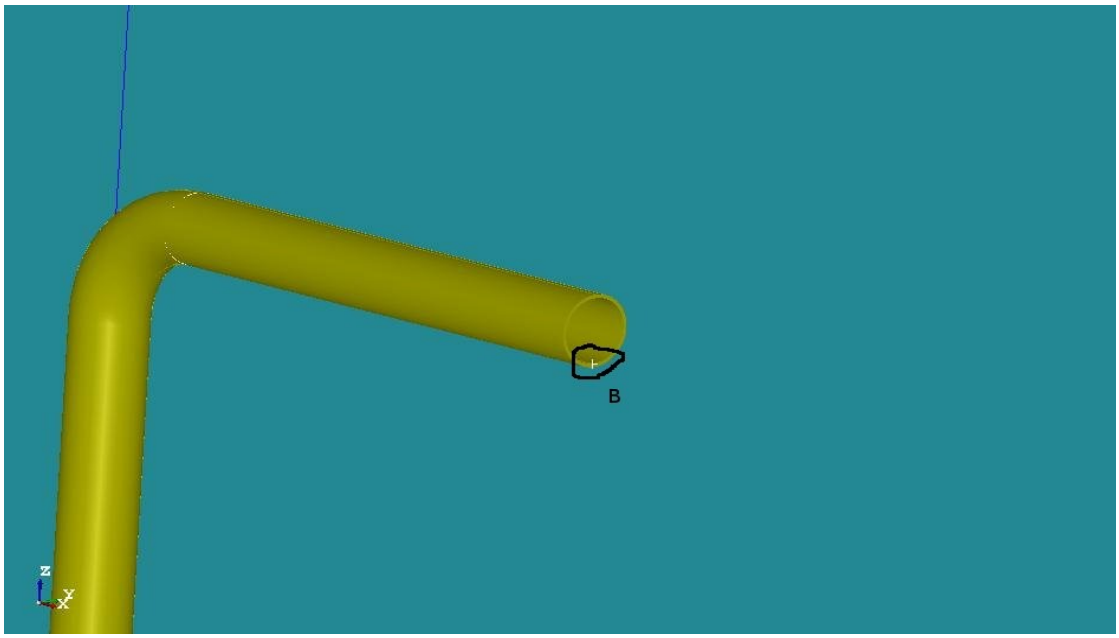
Selon le mode de construction (le 1er procédé), il peut être nécessaire de réaliser une partition par des plans des sections entrée et sortie de coude afin d'obtenir une géométrie topologiquement équivalente à un hexaèdre (6 faces).
Pour la géométrie générée suite au premier procédé, il faut créer plusieurs plans pour partitionner la tuyauterie : un plan `Y = 3`, un plan `X = 0.6` (Menu `New Entity → Basic → Plane : point + Vector` donc `C + AC` / `D + BD`), et une surface courbé à partir d u chemin ACDB créé (`W ire_ 1`) : m enu `New Entity → Generation → E xtrusion` s uivant l'axe Z, puis `Operations / Transformation / Translation` pour que la surface courbée coupe entièrement la tuyauterie .

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` (surface en bas pour encastrer), `Efond` (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 ($d1$) et un autre groupe de bord avec une arête de circonférence ($L1$) 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 `Efond`, en bas, sur la surface interne du tuyau.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



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 : Mapping.
- 1D Wire Discretisation avec l'hypothèse basique Number of Segment (15 segments par edge.

Puis calculer le maillage (Menu Mesh → Compute).

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 dl. Par exemple, l'hypothèse basique Number of Segments avec 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 $L1$. P ar exemple, 2 0 segments sur $L1$ et l'hypothèse supplémentaire « Propagation of 1D hypothese on Opposite Edges ».

Puis calculer le maillage (Menu Mesh → Compute).

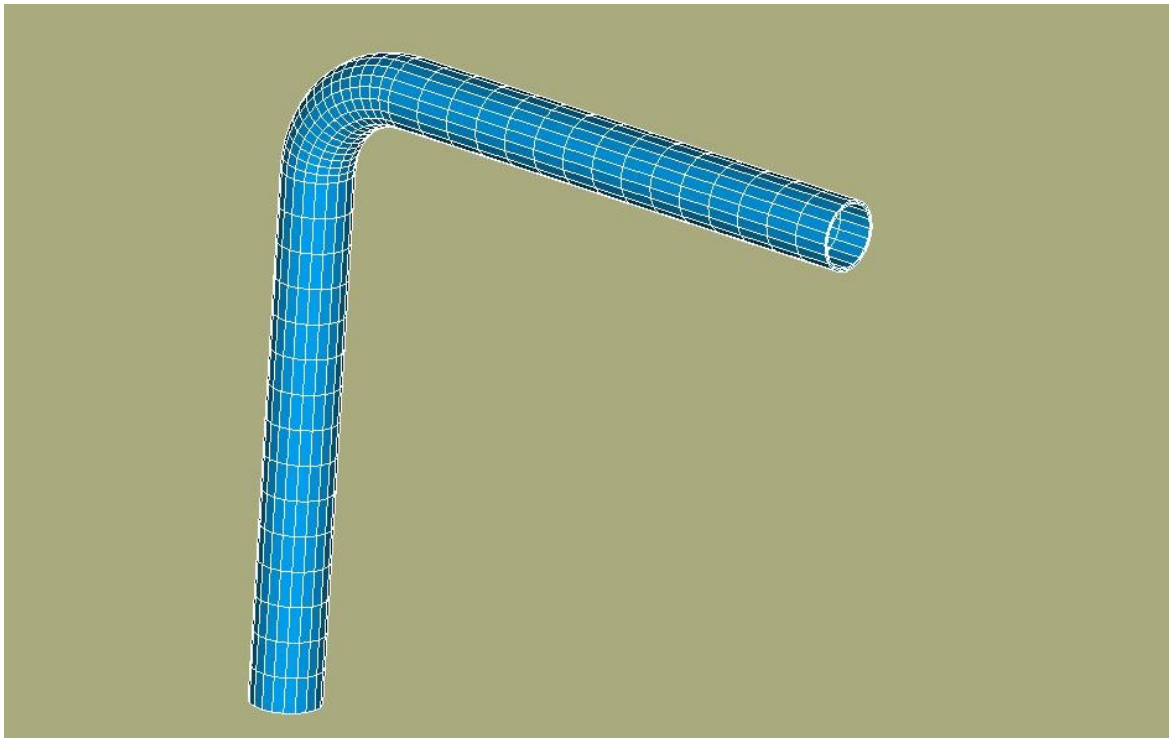
Créer les groupes de mailles correspondants aux groupe géométriques (Menu Mesh → Create Groups from Geometry) .
Exporter le maillage au format MED .

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.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



4.3 Création et lancement du cas de calcul

Les principales étapes du calcul avec AsterStudy seront :

- **Préparation des données et analyse modale :**
  - Lire le maillage par LIRE_MAILLAGE
  - Affecter le type d'éléments et la modélisation par AFFE_MODELE
  - Définir et affecter le matériau par DEFI_MATERIAU et AFFE_MATERIAU
  - Définir les conditions aux limites par AFFE_CHAR_MECA : option DDL_IMPO pour encastrer base.
  - Assembler les matrices de masse et de rigidité du système par ASSEMBLAGE :

```
ASSEMBLAGE(MODELE= … ,
           CHAM_MATER= … ,
           CHARGE= … ,
              # Numérotation des inconnues d'un système
              # d'équations linéaires
                NUME_DDL=CO(' … '),
                MATR_ASSE=(_F(MATRICE=CO(' … '),
                              OPTION='RIGI_MECA',),
                           _F(MATRICE=CO(' … '),
                              OPTION='MASS_MECA',),),);
```

  - Calculer les 10 premiers modes propres par CALC_MODES

```
CALC_MODES(MATR_RIGI= … ,
           MATR_MASS= … ,
           OPTION='PLUS_PETITE',
           CALC_FREQ=_F(NMAX_FREQ= 10 ,),)
```

  - Extraire et visualiser les modes propres par IMPR_RESU.

On lancera ensuite le calcul dans le module AsterStudy. On recommande de visualiser les animations dans l'onglet Results d'Asterstudy.
On pourra également visualiser les modes dans Paravis en les « déformant » :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Cliquer droite le fichier des résultats dans l'onglet `Case View → Data Files`, et cliquer `Open In Paravis` pour charger les résultats en choisissant le format `mode` au lieu de `time`, puis cliquer `Apply` pour valider
- Appliquer le filtre dans `Filters → Mechanics → Normal modes animation (real)`, et valider
- Afficher la fenêtre `Animation view` (menu `View → Windows → Animation View`), et ajouter une animation pour le filtre ci-dessus par cliquer `+` à côté de `Normalmodesanimationreal`
- Choisir le mode à visualiser (`Mode Array Selection`) dans la fenêtre `Properties` à gauche et valider, puis cliquer le bouton `Play` (►) pour visualiser le mouvement de mode

- **Analyse transitoire**

Pour l'analyse transitoire à partir des modes propres calculés, on partira le « wizard » ci-dessous. On y ajoutera les commandes nécessaires à la suite de l'analyse.

- Continuer le calcul dans un nouveau stage par la commande `POURSUITE`
- Définition de la discrétisation temporelle à l'aide de comande `DEFI_LIST_REEL` : de 0s à 2.0s avec un pas de temps de 0.0001s.

Construction de la force ponctuelle

- Définition de la charge unitaire (valeur à 1) « force sur la section B » (`AFFE_CHAR_MECA / FORCE_FACE`).
- Calcul des vecteurs forces élémentaires (`CALC_VECT_ELEM / OPTION='CHAR_MECA'`).
- Assemblage du vecteur force (`ASSE_VECTEUR`).
- Définition de la fonction évoluée avec le temps par `FORMULE : VALE` pour l'expression $FY(t)=10\,000\,000.\sin(2\pi Freq1.t)$ dirigée selon l'axe Y et appliquée sur la section B, où $Freq1=20\,Hz$. Il faut d'abord déclarer les variables utilisées dans la formule.
- Évoluer la fonction par `CALC_FONC_INTERP` suivant la liste des instants définie. Avec `PROL_GAUCHE/DROITE = CONSTANT` pour définir la courbe hors le cadre de la liste des instants.

Transitoire sur base modale

- Projection du problème assemblé sur la base des modes propres

```
PROJ_BASE (BASE= … ,
          MATR_ASSE_GENE= (
                          # Pour la matrice de masse
                           _F( MATR_ASSE = … ) ,
                          # Pour la matrice de rigidité
                           _F( MATR_ASSE = … ) ,
                           # Pour la force dynamique
          VECT_ASSE_GENE= _F( TYPE_VECT = 'FORC',
                              VECT_ASSE = … ), )).
```

- Calcul transitoire par recombinaison modale (`DYNA_VIBRA`)

```
DYNA_VIBRA (TYPE_CALCUL='TRAN',
            BASE_CALCUL='GENE',
            SCHEMA_TEMPS= _F(SCHEMA = 'DIFF_CENTRE'),
            AMOR_MODAL = … ,
            MATR_MASS   =  … ,
            MATR_RIGI   =  … ,
            EXCIT = … ,
            INCREMENT = …,
            … ).
```

- Récupération des déplacements en Y au point B (`RECU_FONCTION`) : `RESU_GENE`, `GROUPE_NO`, `NOM_CHAM=DEPL`, `NOM_CMP=DY`.
- Impression de ces fonctions au format `XMGRACE` (`IMPR_FONCTION`) : `FORMAT`, `UNITE`, `COURBE`, etc.
- Visualiser les champs de déplacement :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1. Commande REST_GENE_PHYS : parce que le type des résultats générés (base physique) directement par DYNA_VIBRA ne peut pas imprimer au format MED par IMPR_RESU , il faut restituer dans la base physique des résultats en coordonnées généralisées en donnant LIST_INST , NOM_CHAM , RESU_GENE . Attention : les pas de temps nombreux conduit le fichier MED très lourd, et on recommande de redéfinir une liste des instants, par exemple avec un pas de temps 0.01s.
2. Commande IMPR_RESU : imprimer au format MED

4.4 Post-traitement des résultats

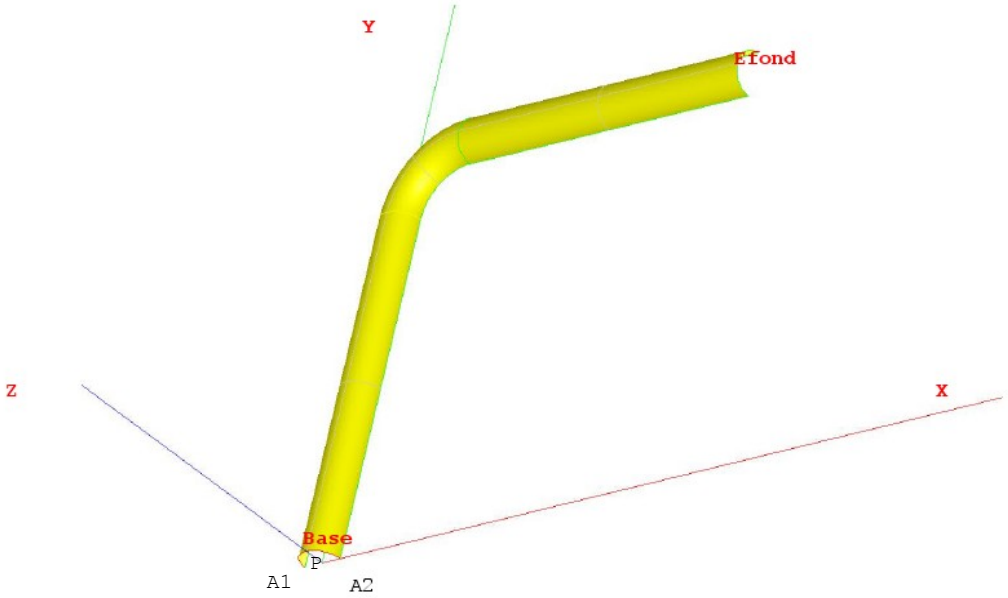
On peut visualiser directement la courbe des déplacements DY au point B en fonction du temps après IMPR_FONCTION au format XMGRACE.

Importer les résultats transitoires dans l'onglet Results, et vérifier le déplacements DY sur un point à l'extrémité du tuyau (voir le chapitre 2.2.2).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 maille qu'une demi-surface.
Conditions aux limites et chargement : encastrement aux deux extrémités de la tuyauterie, et pression à la surface interne.



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 → Point / Arc`).Il suffit ensuite de créer le premier tuyau droit AC à partir de l'arc de cercle $Base$ par le menu `New Entity → Generation → Extrusion : Vector = OY, Height = 3.`

Pour créer le coude, il faut récupérer l'extrémité du tuyau AC en appliquant le menu `New Entity → Explode (Edge)`, puis créer un vecteur parallèle à l'axe Z et passant le point O $(0.6, 3.0, 0.)$. Ensuite générer la géométrie du coude par le menu `New Entity → Generation → Revolution`.

Enfin, appliquer la même démarche pour le tuyau DB (`Explode` puis `Extrusion`).

Créer un "`compound`" (Menu `New Entity → Build → Compound`) en sélectionnant les trois parties de la tuyauterie.

On créera ensuite les groupes des mailles 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 : Mapping`.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- 1D Wire Discretisation avec l'hypothèse basique Number of Segment (15 segments par edge .

Puis calculer le maillage (Menu Mesh → Compute).

Pour permettre un raffinement différent selon les edges, on créera un sous-maillage (Menu Mesh → Create Sub-mesh) définissant l'hypothèse basique Number of Segment sur la circonférence, par exemple 10 segments sur *base* 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 groupe 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.

Les principales étapes de ce calcul mécanique 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. La tuyauterie seramodélisée 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 surface).
- Définir le matériau : Commande DEFI_MATERIAU : E, NU, ALPHA
- Affecter le matériau : Commande AFFE_MATERIAU. Les caractéristiques mécaniques sont identiques sur toute la structure.
- 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* , et des conditions de symétrie (déplacement normal DZ nul et rotations DRX et DRY nulles) sur le groupe de mailles *Symetrie* : DDL_IMPO.
  - Une pression interne P : PRES_REP. Il faut convertir la pression P à la surface interne en la pression à la surface moyenne.
- Résoudre le problème élastique : Commande MECA_STATIQUE : CARA_ELEM, CHAM_MATER, EXCIT, MODELE.
- Imprimer les déplacements et les contraintes au format MED : Commande IMPR_RESU . .
- Pour lancer le cas de calcul, en colonne gauche, cliquer sur l'onglet History View .

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 encastré.
- 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`.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)