

Manuel de Validation**Fascicule V7.15 : Thermo-mécanique statique linéaire des systèmes volumiques (formation)****Document V7.15.100**

FORMA01 - Travaux pratiques de la formation de base à l'utilisation du Code_Aster

Résumé :

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

Les modélisations utilisées sont les suivantes :

- modélisation A : poutres (POU_D_T), qui correspond au TP1,
- modélisation B : coques DKT, maillage GIBI,
- modélisation F : coques DKT, maillage GMSH, identique (au maillage près) à la modélisation B,
- modélisation C : éléments massifs 3D, maillage GIBI,
- modélisation D : poutres (POU_D_T), calcul dynamique,
- modélisation E : éléments TUYAU,,
- Modélisation G : éléments massifs 3D, (maillage GMSH linéaire),
- Modélisation H : éléments massifs 3D, (maillage GMSH quadratique).

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 :

- TP1 : « poutres » voir la modélisation A,
- TP2 : « coques » voir la modélisation F,
- TP3 : « 3D thermo-élastique » voir la modélisation H,
- TP4 : « dynamique » voir la modélisation D.

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 degrés,
- l'épaisseur 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.

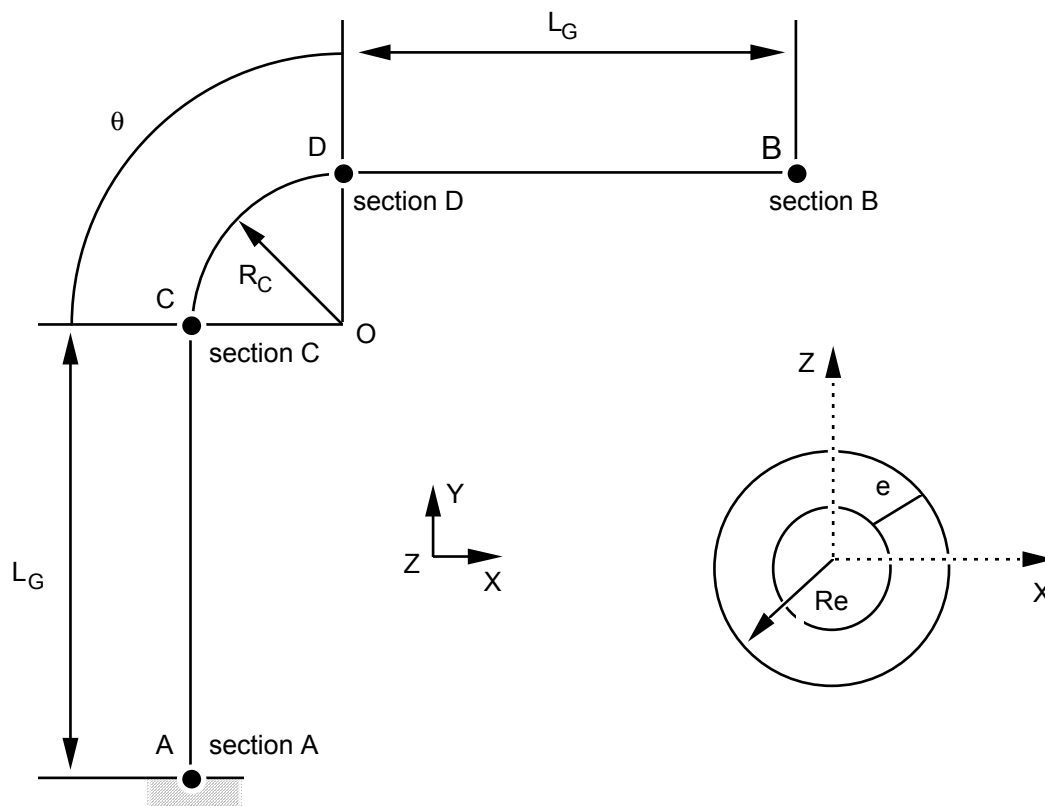


Figure 1.1-a

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 :

- 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 (modélisations C,G H)
 - 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 $\rho C_p = 3.71 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$,

- Pour le calcul dynamique (modélisation D)
 - Le module d'Young vaut $210\,000 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$
 - la masse volumique $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$,
 - l'amortissement des modes propres sera pris à 2% pour les 2 premiers modes, 3% pour le 3ème, 4 % pour le quatrième et 5% pour le cinquième.

1.3 Conditions aux limites et chargements

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

- pour les chargements mécaniques, il y a un encastrement au niveau de la section A,
- pour le chargement thermo-mécanique, il y a encastrement au niveau de la section A et de la section B.

En ce qui concerne les calculs statiques (modélisation A,B,C,E,F,G,H), les chargements appliqués sont de trois types :

- force constante $F_Y = 100\,000 \text{ N}$ dirigée selon l'axe Y et appliquée sur la section B,
- pression interne $P = 15 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, (modélisations B,C,E,F,G,H)
- 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 secondes) et une condition d'échange nul sur la face externe de la tuyauterie (calorifuge) (modélisation C uniquement).

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

$$F_Y(t) = 1\,00\,000 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{Freq1} \cdot t)$$

dirigée selon l'axe Y et appliquée sur la section B,

$$\text{Freq1 telle que } \omega = 2 \cdot \pi \cdot \text{Freq1} = 121 \text{ rad/s.}$$

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. On compare toutefois ci-dessous les résultats des différentes modélisations.

2.2 Résultats des différentes modélisations :

2.2.1 Calcul statique, Force FY

Pour le chargement de force constante FY appliquée sur la section B, on compare le déplacement au point B pour les différentes modélisations (ou au point de coordonnées (Lg+Rc, Lg+Rc, Re) pour les modélisations coque et 3D) :

Modélisation	Chargement force constante FY		
	DX	DY	DRZ
A1 : poutre flexibilité = 1	-2.657E-02	6.702E-02	2.097E-02
A2 : poutre flexibilité RCCM	-2.983E-02	1.156E-01	3.530E-02
B : Coque (maillage GIBI, 1260 QUAD4)	-2.90E-02	1.06E-01	3.27E-02
F : Coque (maillage GMSH, 2240 TRIA3, 700 QUAD4)	-2.89E-02	1.053E-01	3.24E-02
C : 3D (maillage GIBI, 800 HEXA20)	-2.914E-02	1.065E-01	-
G : 3D (maillage GMSH, 7260 TETRA4, 1240 PENTA6)	-2.65E-02	0.731E-01	-
H : 3D (maillage GMSH, 7260 TETRA10, 1240 PENTA15)	-2.94E-02	1.056E-01	-
E : tuyau	-2.935E-02	1.083E-01	3.326E-02
Ecart relatif maximum (sans tenir compte de A1 ni G)	3%	9%	8%

Pour le **chargement de pression**, on compare le déplacement au point B pour les différentes modélisations :

Modélisation	Chargement pression		
	DX	DY	DRZ
B : Coque (maillage GIBI, 1260 QUAD4)	-2.903E-01	4.687E-01	1.305E-01
F : Coque (maillage GMSH, 2240 TRIA3, 700 QUAD4)	-2.890E-01	4.654E-01	1.296E-01
C : 3D (maillage GIBI, 800 HEXA20)	-2.766E-01	4.473E-01	-
G : 3D (maillage GMSH, 7260 TETRA4, 1240 PENTA6)	-2.622E-01	3.967E-01	-
H : 3D (maillage GMSH, 7260 TETRA10, 1240 PENTA15)	-2.734E-01	4.41E-01	-
E : tuyau	-2.763E-01	4.505E-01	1.257E-01
Ecart relatif maximum	9%	17%	4%

Remarques :

Pour que les résultats de la modélisation poutre soient comparables aux autres modélisations, il faut prendre en compte les coefficients de flexibilité des coudes (AFFE_CARA_ELEM) :

$$C_{flex} = \frac{1.65}{\lambda} \text{ avec } \lambda = \frac{eR_{courb}}{R_{moy}^2} \text{ (valeur préconisée par le RCCM, réglementation actuelle).}$$

En ce qui concerne la dynamique, on teste les contraintes obtenues après restitution en base physique du calcul transitoire par recombinaison modale (sur la base des 5 premiers modes propres) de la tuyauterie soumise à la force $F_Y(t)$, à l'instant 0.2s, au point B :

Composante	SIXX	SIYY
Contraintes au point B, instant 0.2s	-5.29775E+05	9.40503E+05

2.3 Incertitude sur la solution

L'écart entre les différentes solutions est compris entre 3% et 17%. Ceci est dû d'une part aux modélisations elles-mêmes (termes correctifs pour la flexibilité dans les poutres, et coefficient sur la pression dans les coques), et d'autre part aux maillages utilisés, qui ne sont pas très fins (pour que le temps de résolution ne soit pas une gêne pour les TP de la formation).

Remarques :

Les résultats 3D sont beaucoup plus précis avec un maillage quadratique.

*Pour la modélisation coque, la pression est appliquée sur la surface moyenne de rayon R_{moy} .
On a donc pris en compte un facteur correctif sur la valeur de la pression à appliquer :
 $P^* = P \cdot R_{int} / R_{moy}$*

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

3.1.1 Maillage GMSH

Le maillage filaire pourra être construit inter-activement à l'aide de GMSH (ou GIBI). Il suffit de définir les points A, B, C D, puis les deux droites AC et DB, le point O et le cercle BC. La taille des éléments pourra être définie comme paramètre. Dans GMSH, on pourra déclarer « physical » les points A et B, puis les droites AC et BD, puis le cercle BC. Une fois le maillage effectué, le sauver (format msh).

Le coude sera modélisé dans un premier temps par au moins quatre éléments de poutres droites (fournir pour GMSH une densité inférieure à 0.25).

En ce qui concerne les tuyaux droits, la discrétisation n'a pas d'influence sur le résultat, car les éléments de poutre droite de Timoshenko (POU_D_T) du *Code_Aster* fournissent des résultats corrects aux nœuds du maillage, même pour une discrétisation avec très peu d'élément, en STATIQUE LINEAIRE uniquement [R3.08.01].

3.2 Fichier de commandes Aster

- Lecture du maillage (PRE_GMSH) et génération du maillage (LIRE_MALLAGE).
- Définition des éléments finis utilisés (AFFE_MODELE). On affectera dans un premier temps au groupe de mailles composant le coude, comme sur les parties droites, la modélisation POU_D_T.
- Définition et affectation du matériau (DEFI_MATERIAU et AFFE_MATERIAU). Les caractéristiques mécaniques sont identiques sur toute la structure.
- Affectation des caractéristiques des éléments poutres (AFFE_CARA_ELEM). La section de tous les éléments de la tuyauterie est circulaire.
- Définition des conditions aux limites et du chargement (AFFE_CHAR_MECA). La tuyauterie est encastree en sa base, au niveau du point A.

Le chargement est une force ponctuelle F_y appliquée au point B.

- Résolution du problème élastique (MECA_STATIQUE). Calcul du champ d'efforts généralisés par élément aux nœuds, à partir du champ de déplacement calculé (option 'EFGE_ELNO_DEPL').
- Impression des résultats (IMPR_RESU). On imprimera sous forme listing le déplacement au point B et les valeurs maximales des efforts.

On imprimera également le champ de déplacement au format GMSH, en vue d'une visualisation des résultats avec GMSH. (utiliser DEFUFI pour définir le fichier de sortie).

Calcul facultatif : poutres courbes et coefficient de flexibilité

On pourra vérifier l'impact d'un coefficient de flexibilité du coude sur les déplacements au point B. Ce coefficient de flexibilité se définit au niveau de la commande AFFE_CARA_ELEM (mot clé DEFI_ARC).

Il faudra alors affecter au groupe de mailles composant le coude la modélisation POU_C_T.

4 Résultats de la modélisation A

4.1 Valeurs testées

Les résultats obtenus avec 2 éléments dans chaque partie droite et 4 éléments dans le coude sont :

Sans coefficient de flexibilité :

Chargement	Valeur testée	Référence	Aster	% différence
Force concentrée Fy en B	Déplacement en B Dx	-2.657E-02	-2.657E-02	0
	Déplacement en B Dy	6.702E-02	6.702E-02	0
	Rotation en B DRZ	2.097E-02	2.097E-02	0

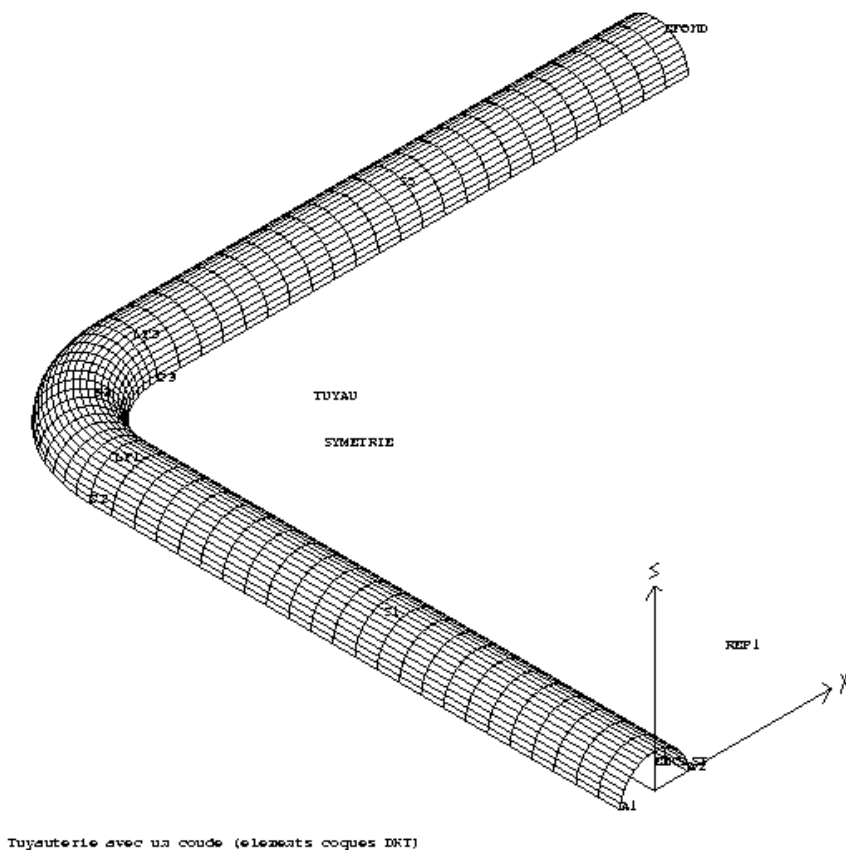
Avec coefficient de flexibilité :

Chargement	Valeur testée	Référence	Aster	% différence
Force concentrée Fy en B	Déplacement en B Dx	-2.983E-02	-2.983E-02	0
	Déplacement en B Dy	1.156E-01	1.156E-01	0
	Rotation en B DRZ	3.530E-02	3.530E-02	0

5 Modélisation B

5.1 Caractéristiques de la modélisation

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.



5.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est créé à l'aide de GIBI. Il comporte 1260 mailles QUAD4, et 1356 nœuds

5.3 Commandes Aster

Les principales étapes du calcul avec Aster seront :

- Lecture du maillage (PRE_GIBI) et génération du maillage (LIRE_MALLAGE).
- Définition des éléments finis utilisés (AFFE_MODELE). Les tuyaux droits et le coude seront modélisés par des éléments de coque (DKT).
- Réorientations des normales aux éléments : on utilisera MODI_MALLAGE pour orienter tous les éléments de la même façon, avec une normale tournée vers l'intérieur du tuyau (étant donnée la convention de signe sur la pression) afin de donner une valeur positive à la pression.

- Définition et affectation du matériau (DEFI_MATERIAU et AFFE_MATERIAU). Les caractéristiques mécaniques sont identiques sur toute la structure.
- Affectation des caractéristiques des éléments coques (AFFE_CARA_ELEM) : épaisseur
- Définition des conditions aux limites et des chargements (AFFE_CHAR_MECA).
- La tuyauterie est encastree en sa base, sur tous les nœuds situés dans le plan Y=0. La tuyauterie présente un plan de symétrie Z=0.
- On calcule deux cas de charge :
 - un effort réparti F^* dirigé selon l'axe Y et appliquée à la section B, (l'effort réparti est tel que la résultante $2\pi i \cdot R_{moy} F^* = F_Y$, F_Y étant la force totale que l'on désire appliquer). Pour appliquer l'effort sur la section B, on utilisera FORCE_ARETE,
 - une pression interne P.

Remarque :

La valeur de la pression P est positive suivant le sens contraire de la normale à l'élément. Pour orienter cette normale il faut utiliser MODI_MALLAGE / ORIEN_NORM_COQUE : définir en A1 un vecteur donnant le sens de la normale (opposée à la pression).

- Résolution du problème élastique pour chaque cas de charge (2 appels à MECA_STATIQUE).
- Impression des résultats (IMPR_RESU).
- On imprimera sous forme listing le déplacement pour chaque résultat sur la section B. On imprimera également au format GMSH, les déplacements.

On pourra dans un deuxième calcul Aster évaluer les contraintes aux nœuds :

- On ajoute dans les caractéristiques coques (AFFE_CARA_ELEM) le vecteur V définissant le repère de dépouillement (mot-clé ANGL_REP). On peut prendre par exemple V=Oz.
- Calcul du champ de contraintes par éléments aux nœuds pour chaque cas de charge (option 'SIGM_ELNO_DEPL'). Les contraintes sont calculées dans le repère local défini pour chaque élément à l'aide du vecteur V (mot clé ANG_REP précédent). Utiliser NIVE_COUCHE pour définir le niveau de calcul dans l'épaisseur.

6 Résultats de la modélisation B

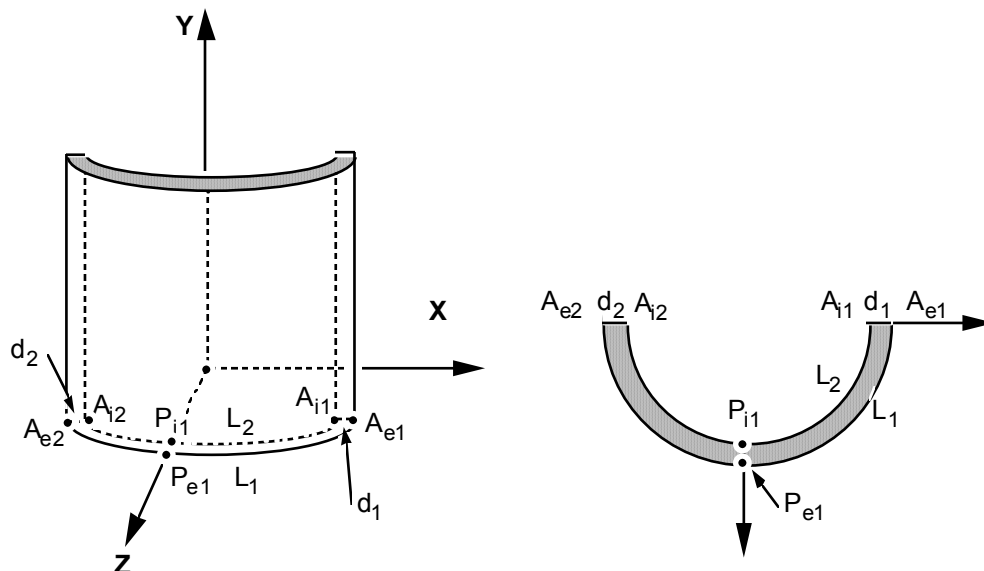
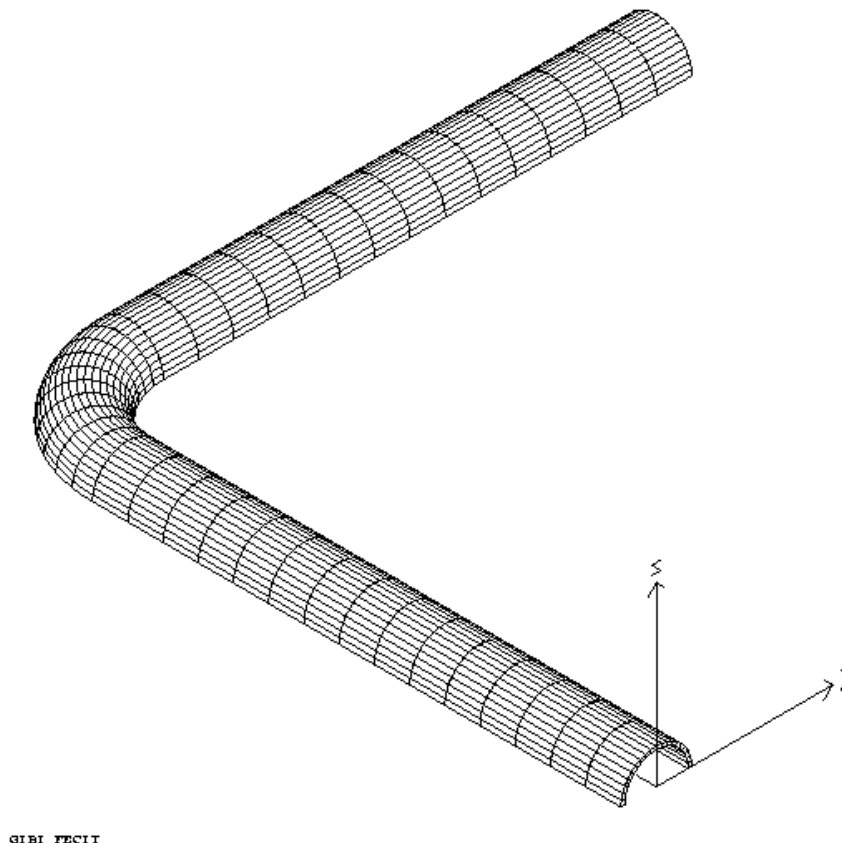
6.1 Valeurs testées

Chargement	Valeur testée	Référence	Aster	% différence
Force concentrée F_y en B	Déplacement en B Dx	-2.901E-02	-2.901E-02	0
	Déplacement en B Dy	1.060E-01	1.060E-01	0
	Rotation en B DRZ	3.274E-02	3.274E-02	0
Pression interne	Déplacement en B Dx	-2.903E-01	-2.903E-01	0
	Déplacement en B Dy	4.687E-01	4.687E-01	0
	Rotation en B DRZ	1.305E-01	1.305E-01	0

7 Modélisation C

7.1 Caractéristiques de la modélisation

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.



7.2 Caractéristiques du maillage

4240 mailles HEXA20, 5913 nœuds

7.3 Commandes Aster

Pour le cas de charge thermique, l'étude nécessite un premier calcul thermique transitoire suivi d'un calcul mécanique.

Afin d'utiliser les possibilités de reprise d'un calcul, on fera deux exécutions successives et couplées avec *Aster*. Dans la première exécution, on fera la résolution des différents cas de charge, dans la seconde des post-traitements sur le cas de charge thermo-mécanique.

Les principales étapes de la **première** exécution avec *Aster* seront :

Lecture du maillage (`PRE_GIBI`) et génération du maillage (`LIRE_MALLAGE`) en éléments quadratiques.

- Définition des éléments finis utilisés (`AFFE_MODELE`). On définira un modèle pour le calcul thermique et un modèle mécanique.
- Définition et affectation du matériau (`DEFI_MATERIAU` et `AFFE_MATERIAU`). Les caractéristiques thermiques et mécaniques sont identiques sur toute la structure.
- Définition des conditions aux limites thermiques (`DEFI_FONCTION` et `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). On considère que la tuyauterie est calorifugée et donc on applique une condition d'échange nul sur la surface extérieure.
- Résolution du problème thermique (`THER_LINEAIRE`). Le calcul du champ de température s'effectue pour les deux instants du transitoire (5. et 10. s).
- Définition des trois cas de charge mécaniques : conditions aux limites et chargement mécanique ou thermique (`AFFE_CHAR_MECA`) :
 - un effort FY dirigé selon l'axe Y et appliqué à la section B, (utiliser `FORCE_FACE`. La valeur de l'effort surfacique de résultante Fy peut être calculée dans Aster à l'aide de `DEFI_VALEUR`),
 - une pression interne,
 - le transitoire thermique précédemment calculé,
 - la tuyauterie est encastree en sa base (Ae1, Ai1, Ae2, Ai2), sur tous les nœuds situés dans le plan d'équation Y=0. Pour le cas de charge thermique, la section B de la tuyauterie est aussi encastree.
- Résolution pour les différents cas de charge du problème mécanique et calcul du champ de contraintes aux nœuds par élément (3 appels à `MECA_STATIQUE`)
- A l'aide de `CALC_ELEM`, calcul des contraintes par éléments extrapolées aux nœuds (`SIEF_ELNO_ELGA`) et des contraintes équivalentes de Von Mises (`EQUI_ELNO_SIGM`).
- Impression des résultats (`IMPR_RESU`).
 - On imprimera sous forme listing d'une part le déplacement sur la section B, et d'autre part les valeurs maximales du tenseur de contraintes, pour les cas de charge mécaniques.
 - On imprimera pour le calcul thermo-mécanique, les déplacements, et la composante VMIS sur champ `EQUI_ELNO_SIGM` au format CASTEM.

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

- Création d'une table par extraction de valeurs sur un chemin (INTE_MAIL_3D et POST_RELEVE_T).
- On extraira des valeurs de température et de déplacement pour un azimuth au niveau de l'entrée de coude pour le cas de charge thermo-mécanique. L'azimut est défini par le chemin d'extrémités (0. 3. 0.1) et (0. 3. 0.2).
- Impression de courbes (IMPR_COURBE).
- On imprimera au format AGRAF l'évolution de la température et de la composante suivant Y du champ de déplacement, le long de la l'azimut précédent. On pourra ensuite visualiser ces courbes au moyen de AGRAF.

8 Résultats de la modélisation C

8.1 Valeurs testées

Chargement	Valeur testée	Référence	Aster	% différence
Force concentrée Fy en B	Déplacement en B Dx	-2.907E-02	-2.907E-02	0
	Déplacement en B Dy	1.065E-01	1.065E-01	0
Pression interne	Déplacement en B Dx	-2.763E-01	-2.763E-01	0
	Déplacement en B Dy	4.472E-01	4.472E-01	0
Température à l'instant 10s	Température en A11	70	70	0
	Contrainte de Von Mises maximum	1.2383 10 ⁸	1.2383 10 ⁸	0

9 Modélisation D

9.1 Caractéristiques de la modélisation

La géométrie est identique à celle de la modélisation A. Le maillage doit être assez fin pour obtenir une solution correcte en dynamique, notamment pour décrire correctement les modes propres : Le coude et les tuyaux droits seront modélisés chacun par au moins 5 éléments de poutres droites de Timoshenko `POU_D_T`.

On souhaite tout d'abord connaître les premiers modes propres.

Ensuite on fera une analyse transitoire de la réponse du tuyau à la force sinusoïdale entre 0.0 et 2.0 s. La structure est initialement au repos. On pourra dans un premier temps faire l'analyse sur base modale. On pourra comparer les résultats de l'analyse sur base modale avec une analyse directe sur base physique.

9.2 Caractéristiques du maillage

9.2.1 Maillage GMSH

Le maillage sera obtenu avec GMSH, comme pour la modélisation A. Attention à ne pas oublier dans le fichier de commande ASTER à créer les groupes de mailles « physiques » et, ensuite, dans le fichier de commande ASTER de créer les groupes de nœuds correspondant aux groupes de mailles grâce à la commande `DEFI_GROUP`.

9.2.2 Maillage alternatif : avec GIBI

Pour ceux qui préfèrent GIBI, on pourra créer le maillage à l'aide de ce mailleur, de la façon suivante : on créera à l'éditeur un fichier de données qui comprendra la liste des instructions que l'on soumettra à GIBI. Les différentes étapes de la modélisation avec GIBI seront :

- Définition des options de maillage par la procédure `OPTION`.
Les coordonnées des points seront introduites en dimension 3.
Les éléments seront de type `SEG2`.
- Définition des points A, B, C, D, O.
Les points seront nommés PA, PB, PC, PD, PO.
- Maillage de la tuyauterie
Pour le maillage de la tuyauterie, on utilisera les opérateurs `DROITE`, `CERCLE` et `ET`.
Le découpage sera d'un seul élément pour les tuyaux droits et le coude.
- Visualisation du maillage final.
La visualisation se fait par la procédure `TRACER`, pour laquelle on doit spécifier un point, qui indique la position de l'œil qui regarde l'objet.
- Sauvegarde du maillage pour son utilisation dans Aster.
Pour pouvoir relire le maillage par Aster il faut le sauvegarder dans un fichier formaté, cette sauvegarde se fait par la procédure `SAUVER` avec le mot clé `FORMAT`. Le fichier qui sera créé aura le même nom que le fichier de données GIBI, mais aura pour extension ".mgib".
- Arrêt de l'exécution de GIBI.
Pour sortir de GIBI il faut l'indiquer par la directive `FIN`.

Remarque :

| Toute instruction GIBI se termine par le symbole ";".

9.3 Commandes Aster

Les principales étapes du calcul avec Aster seront :

9.3.1 Préparation des données et analyse modale

- Maillage (ne pas oublier le `PRE_GMSH` ou le `PRE_GIBI`).
- Définition des éléments finis utilisés (`AFFE_MODELE`).
- On utilisera les groupes de mailles prévus dans GMSH (ou GIBI).
- Définition et affectation du matériau (`DEFI_MATERIAU` et `AFFE_MATERIAU`).
- Les caractéristiques mécaniques sont identiques sur toute la structure.
- Affectation des caractéristiques des éléments poutres (`AFFE_CARA_ELEM`).
- La section de tous les éléments de la tuyauterie est circulaire, de rayon 0.2 m et d'épaisseur 0.02 m.
- Le coude se constitue d'un arc de cercle de centre le point O et de rayon 0.6 m. Pour définir l'élément courbe, on utilisera le mot clé `DEFI_ARC`.
- Définition des conditions aux limites et du chargement (`AFFE_CHAR_MECA`). Le point A est encastré.
- Définition des matrices du problème élastique (`MACRO_MATR_ASSE`).
- Calcul des 5 premiers modes propres (`MODE_ITER_SIMULT`).
- Impression des modes propres (`IMPR_RESU`) : on imprimera le maillage et les modes au format GMSH pour une visualisation dans GMSH (ou au format CASTEM, en vue d'une visualisation des résultats avec GIBI). Dans le cas de GMSH, ne pas oublier d'ouvrir l'unité logique du fichier de post-traitement par un `DEFUFI` !

9.3.2 Analyse transitoire

Construction de la force ponctuelle

- Définition de la charge force au point B (`AFFE_CHAR_MECA FORCE_NODALE`).
- 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 (`MACRO_PROJ_BASE`).
- Calcul transitoire par recombinaison modale (`DYNA_TRAN_MODAL`).
- Récupération des déplacements, vitesse en Y en B, C, D (`RECU_FONCTION`).
- Impression de ces fonctions au format listing et AGRAF (`IMPR_COURBE`).
- On pourra éventuellement déterminer les contraintes MIN et MAX dues aux efforts généralisés durant le transitoire en passant par une restitution sur la base physique (`REST_BASE_PHYS`), un calcul des contraintes (`CALC_ELEM`), un post-traitement habile pour calculer le maximum au cours du temps (`CREA_CHAMP`) et une écriture dans le fichier résultat (`IMPR_RESU`).

Calcul direct sur base physique : transitoire sur base physique

- Calcul transitoire direct par Newmark (DYNA_LINE_TRAN).
- Récupération des déplacements, vitesse en Y en B, C, D (RECU_FONCTION).
- Impression de ces fonctions au format listing et AGRAF (IMPR_COURBE).
- Calcul du MAX (spatial et temporel) des contraintes dues aux efforts généralisés.

9.3.3 Post-traitements

On visualisera avec GMSH ou GIBI le maillage et les cinq premiers modes propres de la structure. On tracera également à l'aide d'AGRAF l'évolution des déplacements en fonction du temps aux points B, C et D.

Enfin, on pourra déterminer le maximum (et minimum) spatial et temporel des contraintes dues aux efforts généralisés, afin d'estimer les sollicitations maximales que subit le tuyau au cours de cet essai.

9.3.3.1 Aide pour le post-traitement avec GMSH

Le post-traitement dans GMSH est assez intuitif. Cependant quelques points sont à connaître :

- On doit mettre GMSH en mode *Post-Processing*.
- Dans *Tools/Options*, l'onglet *Aspect* permet de spécifier *Displacement* comme *Vector display*, i.e. d'observer les modes comme une déformation de la structure. On pourra aussi préciser l'amplitude de la déformation grâce à la case *Vector size*.
- Le bouton *Step* de l'onglet *General* permet, quant à lui, de faire défiler les différents modes (qui sont vus dans GMSH comme des « pas de temps »).

9.3.3.2 Aide pour le post-traitement avec GIBI (éventuellement)

On fournira un fichier de commandes GIBI permettant d'effectuer les post-traitements graphiques. Les principales commandes GIBI utilisées sont :

```
* Relecture du fichier résultat au format 'CASTEM' provenant d'Aster :
OPTI REST FORMAT 'nom_de_fichier.cast' ;
REST FORMAT ;
* Récupération du nombre d'instants calculés dans l'objet « resu » issu
d'Aster
      ninst = DIME resu ;
* On peut l'afficher :
      LIST ninst ;
i=0 ;
* Boucle sur tous les instants archivés :
repetier ninst boucl1 :
      i = i+1 ;
      ti = resu . i . inst ;
* Récupération des champs de déplacements dans le résultat :
      ut = resu . i . depl ;
* visualisation de la déformée
      defo1 = defo mail ut 100. rouge ;
      defo0 = defo mail ut 0. vert ;
      titre 'Tuyauterie déformée instant ' ti ;
      trac oe (defo1 et defo0) ;
fin boucl1 ;
```

9.3.3.3 Aide pour le post-traitement avec AGRAF

Visualisation de courbes de résultats imprimées au format AGRAF. Dans la suite, on remplacera <résultat> par le nom du fichier résultat de type AGRAF produit par la commande IMPR_COURBE dans le fichier de commandes.

Les différentes étapes de la visualisation des résultats avec AGRAF sont :

- lancement d'AGRAF: taper 'agraf' dans une fenêtre Unix,
- ouverture d'un fichier Directives : menu Directives (cf. Tableau 1),
- sélectionner Ouvrir, donner un nom de directive par la BSF (par exemple <résultat>.digr), cliquer dans la BSF sur Ouvrir Directives, et confirmer la création d'un nouveau fichier de directives,
- lecture des résultats issus d'Aster : menu Données (cf. Tableau 1),
- sélectionner le fichier <résultat>.dogr grâce à la BSF,
- définition du graphique à tracer : menu Graphiques,
- sélectionner Spécifier / une fenêtre intitulée Spécification des courbes d'un graphique s'ouvre, une zone Titre permet de donner un titre au graphique, remplacer Nouveau graphique par le titre de votre graphique (ex : Déplacement du tuyau) - en dessous, actionnables à souhait par un toggle-button, figurent des lignes de définition des courbes à tracer,
- zone Abscisses on définit le n° du tableau et le n° de la colonne constituant les données à mettre en abscisses de la courbe (1 1 pour la 1^{ère} courbe),
- zone Ordonnées on définit le no du tableau et le no de la colonne constituant les données à mettre en ordonnées de la courbe (1 2 pour la première courbe),
- zone Marqueur on définit la forme du marqueur, la périodicité de tracé de ce marqueur (tous les n points de la courbe), (10),
- zone Légende permet de donner un texte de légende décrivant la courbe la courbe (DY-B),
- cliquer sur Sauvegarder pour enregistrer la définition du graphique,
- Sauvegarde et actualisation du graphique à tracer : menu Graphiques,
 - bouton Sauvegarder,
 - bouton Tracer,
- Impression POSTSCRIPT du graphique : fenêtre Tracé,
- bouton Imprimer le Tracé,

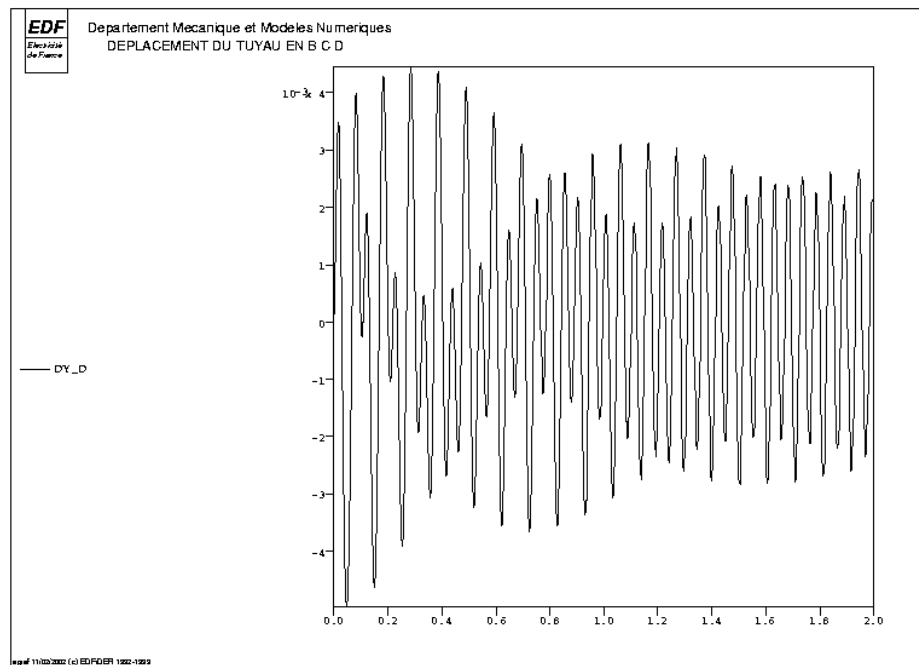
10 Résultats de la modélisation D

10.1 Valeurs testées

Ce test est un test de non régression. Les valeurs de référence sont les résultats obtenus avec la version 6.4 du Code_Aster.

Chargement	Valeur testée	Référence	Aster	% différence
Force concentrée Fy en B	Contrainte en B due à l'effort normal SN	$-6.20356 \cdot 10^4$	$-6.20356 \cdot 10^4$	0

Outre ce résultat de non régression, on peut observer le déplacement selon Y du point D :



On observe que les modes de la structure sont excités durant la première seconde du transitoire, ce qui explique l'allure chahutée de la courbe de déplacement. Ensuite les mouvements des modes propres se trouvent amortis et il ne reste que le mouvement stationnaire réglé sur la fréquence de la force sinusoïdale au point B.

11 Modélisation E

11.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation TUYAU. Le coude est modélisé par 20 éléments de type segment à 3 nœuds.

Les tuyaux droits sont modélisés par 20 éléments de type segment à 3 nœuds.

Les deux premiers chargements (force ponctuelle FY et pression interne) sont traités.

11.2 Caractéristiques du maillage

60 mailles SEG3, 126 nœuds

11.3 Fonctionnalités testées

Commandes

AFFE_CHAR_MECA	FORCE TUYAU	PRES
MECA_STATIQUE		
CALC_ELEM	OPTION	SIGM_ELNO_DEPL
AFFE_CHAR_MECA	FORCE_NODALE	FY

12 Résultats de la modélisation E

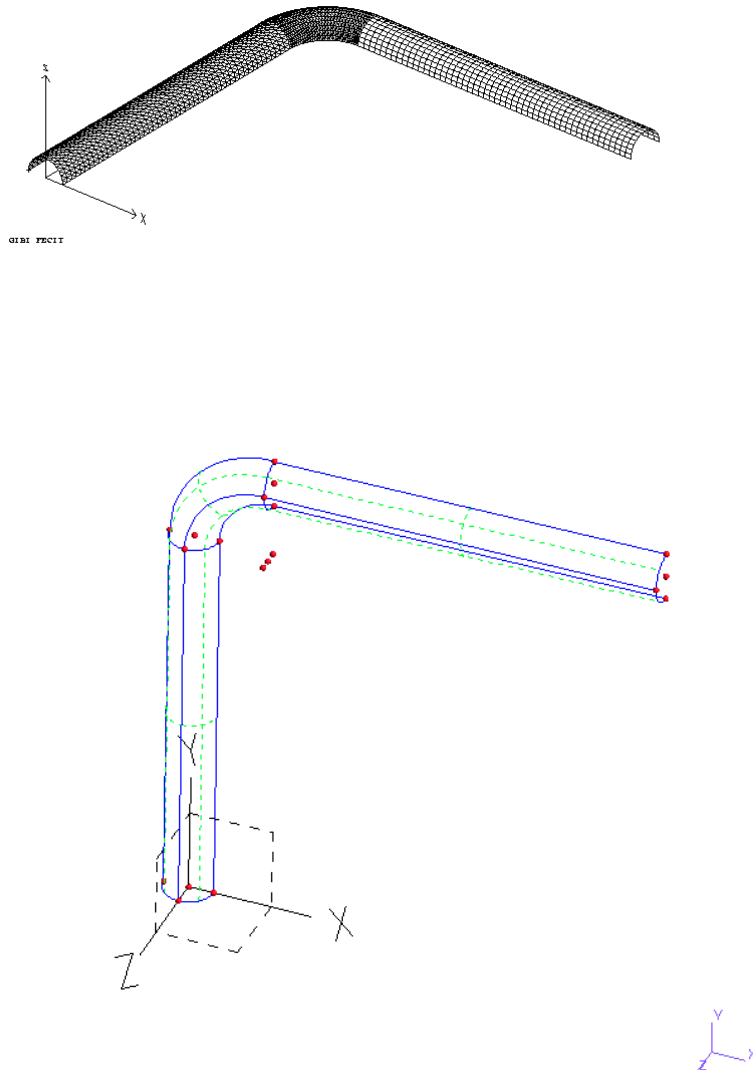
12.1 Valeurs testées

Chargement	Valeur testée	Référence	Aster	% différence
Force concentrée Fy en B (Référence tuyau)	Déplacement en B Dx	-2.935E-02	-2.935E-02	0
	Déplacement en B Dy	1.083E-01	1.083E-01	0
	Rotation en B DRZ	3.326E-02	3.326E-02	0
Pression interne	Déplacement en B Dx	-2.7624E-01	-2.7624E-01	0
	Déplacement en B Dy	4.505E-01	4.505E-01	0
	Rotation en B DRZ	1.257E-01	1.257E-01	0

13 Modélisation F

13.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation en éléments coques, est en tous points identique à la modélisation B, hormis le maillage, généré à l'aide de GMSH.



13.2 Caractéristiques du maillage

700 mailles QUAD4, 2240 mailles TRIA3, 1344 nœuds

Le maillage GMSH construit en quadrilatères et triangles est disponible dans la base des tests : le fichier de données géométrique se nomme `forma01f.datg`. (changer l'extension en « .geo »). Il correspond à la géométrie ci-dessus (pour retrouver les numéros des entités « physical » qui correspondent aux groupes de mailles, utiliser Tools/Visibility/Physical). Les groupes correspondent à :

```
GM30 <=> surface du TUYAU
GM28 <=> section B (effort)
GM31 <=> point A1 (-R, 0, 0)
GM27 <=> section A (encastrement)
GM29 <=> SYMETRIE
```

13.3 Commandes Aster

- Lecture du maillage (`PRE_GMSH`) et génération du maillage (`LIRE_MALLAGE`). On peut utiliser `DEFI_GROUP` pour renommer les groupes de mailles selon la correspondance :

```
# GM30 <=> TUYAU
# GM28 <=> EFOND
# GM31 <=> A1
# GM27 <=> ENCAST
# GM29 <=> SYMETRIE
```

- Définition des éléments finis utilisés (`AFFE_MODELE`). Les tuyaux droits et le coude seront modélisés par des éléments de coque (`DKT`).
- Réorientations des normales aux éléments : on utilisera `MODI_MALLAGE` pour orienter tous les éléments de la même façon, avec une normale tournée vers l'intérieur du tuyau (étant donnée la convention de signe sur la pression) afin de donner une valeur positive à la pression.
- Définition et affectation du matériau (`DEFI_MATERIAU` et `AFFE_MATERIAU`). Les caractéristiques mécaniques sont identiques sur toute la structure.
- Affectation des caractéristiques des éléments coques (`AFFE_CARA_ELEM`) : épaisseur
- Définition des conditions aux limites et des chargements (`AFFE_CHAR_MECA`).
- La tuyauterie est encastree en sa base, sur tous les nœuds situés dans le plan $Y=0$. La tuyauterie présente un plan de symétrie $Z=0$.
- On calcule deux cas de charge :
- Un effort réparti F^* dirigé selon l'axe Y et appliquée à la section B, (l'effort réparti est tel que la résultante $2\pi i^* R_{moy} F^* = F_Y$, F_Y étant la force totale que l'on désire appliquer). Pour appliquer l'effort sur la section B, on utilisera `FORCE_ARETE`.
- Une pression interne P. Remarque : La valeur de la pression p est positive suivant le sens contraire de la normale à l'élément. Pour orienter cette normale il faut utiliser `MODI_MALLAGE / ORIEN_NORM_COQUE` : définir en A1 un vecteur donnant le sens de la normale (opposée à la pression).

- Résolution du problème élastique pour chaque cas de charge (2 appels à MECA_STATIQUE).
- Impression des résultats (IMPR_RESU).
- On imprimera sous forme listing le déplacement pour chaque résultat sur la section B. On imprimera également au format GMSH, les déplacements.

On pourra dans un deuxième calcul Aster évaluer les contraintes aux nœuds :

- On ajoute dans les caractéristiques coques (AFFE_CARA_ELEM) le vecteur V définissant le repère de dépouillement (mot-clé ANGL_REP). On peut prendre par exemple V=Oz.
- Calcul du champ de contraintes par éléments aux nœuds pour chaque cas de charge (option 'SIGM_ELNO_DEPL'). Les contraintes sont calculées dans le repère local défini pour chaque élément à l'aide du vecteur V (mot clé ANG_REP précédent). Utiliser NIVE_COUCHE pour définir le niveau de calcul dans l'épaisseur.

14 Résultats de la modélisation F

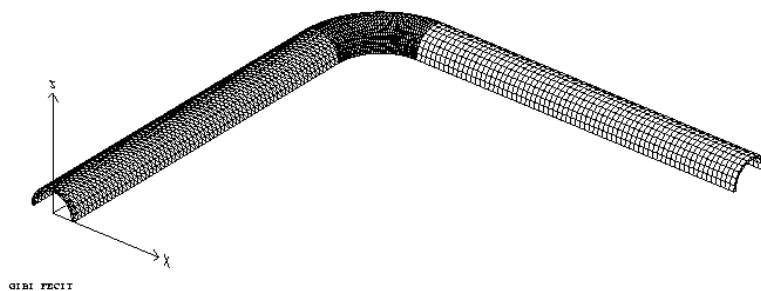
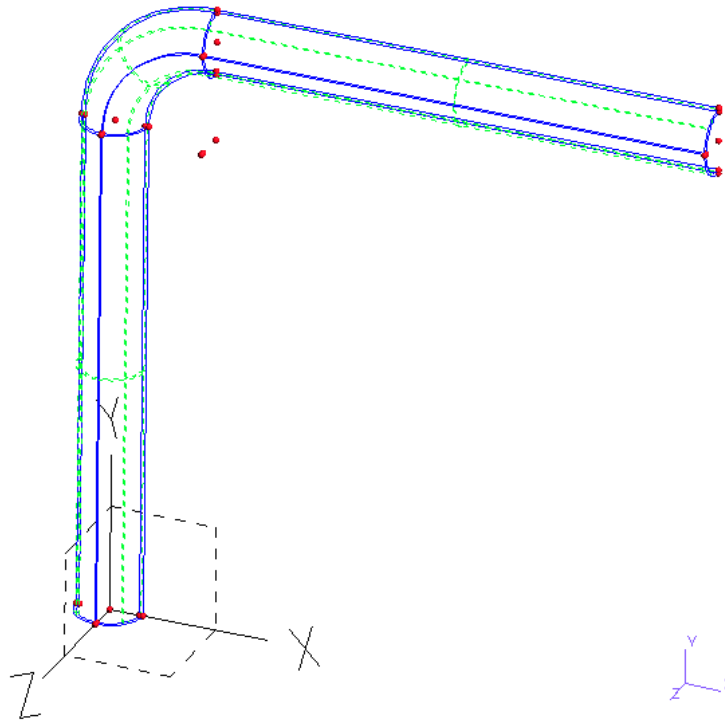
14.1 Valeurs testées

Chargement	Valeur testée	Référence	Aster	% différence
Force concentrée Fy en B	Déplacement en B Dx	-2.89E-02	-2.89E-02	0
	Déplacement en B Dy	1.053E-01	1.053E-01	0
	Rotation en B DRZ	3.24E-02	3.24E-02	0
Pression interne	Déplacement en B Dx	-2.890E-01	-2.890E-01	0
	Déplacement en B Dy	4.654E-01	4.654E-01	0
	Rotation en B DRZ	1.296E-01	1.296E-01	0

15 Modélisation G

15.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation en éléments volumiques, le maillage étant obtenu à l'aide de GMSH. La modélisation est en tous points identique à la modélisation C. Les résultats obtenus diffèrent car les éléments sont linéaires.



15.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 6633
Nombre de mailles et types : 7260 TETRA4
1539 PENTA6
4319 QUAD4
7003 TRIA3

15.3 Commandes Aster

Pour le cas de charge thermique, l'étude nécessite un premier calcul thermique transitoire suivi d'un calcul mécanique.

Afin d'utiliser les possibilités de reprise d'un calcul, on fera deux exécutions successives et couplées avec *Aster*. Dans la première exécution, on fera la résolution des différents cas de charge, dans la seconde des post-traitements sur le cas de charge thermo-mécanique.

Les principales étapes de la **première** exécution avec *Aster* seront :

- Lecture du maillage (`PRE_GMSH`) et génération du maillage (`LIRE_MALLAGE`) en éléments linéaires. On peut utiliser `DEFI_GROUP` pour renommer les groupes de mailles selon la correspondance :

```
TUYAU      <=> GM10000
EFOND      <=> GM10005
ENCAST     <=> GM10001
SYMETRIE   <=> GM10002
SURFINT    <=> GM10004
SURFEXT    <=> GM10003
```

- Définition des éléments finis utilisés (`AFFE_MODELE`). On définira un modèle pour le calcul thermique et un modèle mécanique.
- Définition et affectation du matériau (`DEFI_MATERIAU` et `AFFE_MATERIAU`). Les caractéristiques thermiques et mécaniques sont identiques sur toute la structure.
- Définition des conditions aux limites thermiques (`DEFI_FONCTION` et `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). On considère que la tuyauterie est calorifugée et donc on applique une condition d'échange nul sur la surface extérieure.
- Résolution du problème thermique (`THER_LINEAIRE`). Le calcul du champ de température s'effectue pour les deux instants du transitoire (5. et 10. s).
- Définition des trois cas de charge mécaniques : conditions aux limites et chargement mécanique ou thermique (`AFFE_CHAR_MECA`) :
 - un effort FY dirigé selon l'axe Y et appliqué à la section B, (utiliser `FORCE_FACE`. La valeur de l'effort surfacique de résultante Fy peut être calculée dans *Aster* à l'aide de `DEFI_VALEUR`),
 - une pression interne,
 - le transitoire thermique précédemment calculé,
 - la tuyauterie est encastree en sa base (Ae1, Ai1, Ae2, Ai2), sur tous les nœuds situés dans le plan d'équation Y=0. Pour le cas de charge thermique, la section B de la tuyauterie est aussi encastree.

- Résolution pour les différents cas de charge du problème mécanique et calcul du champ de contraintes aux nœuds par élément (3 appels à MECA_STATIQUE)
- A l'aide de CALC_ELEM, calcul des contraintes par éléments extrapolées aux nœuds (SIEF_ELNO_ELGA) et des contraintes équivalentes de Von Mises (EQUI_ELNO_SIGM).
- Impression des résultats (IMPR_RESU).
 - On imprimera sous forme listing d'une part le déplacement sur la section B, et d'autre part les valeurs maximales du tenseur de contraintes, pour les cas de charge mécaniques.
 - On imprimera pour le calcul thermo-mécanique, les déplacements, et la composante VMIS sur champ EQUI_ELNO_SIGM au format GMSH.

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

- Création d'une table par extraction de valeurs sur un chemin (INTE_MAIL_3D et POST_RELEVE_T).
- On extraira des valeurs de température et de déplacement pour un azimuth au niveau de l'entrée de coude pour le cas de charge thermo-mécanique. L'azimuth est défini par le chemin d'extrémités (0. 3. 0.1) et (0. 3. 0.2).
- Impression de courbes (IMPR_COURBE).
- On imprimera au format AGRAF l'évolution de la température et de la composante suivant Y du champ de déplacement, le long de la l'azimuth précédent. On pourra ensuite visualiser ces courbes au moyen de AGRAF.

16 Résultats de la modélisation G

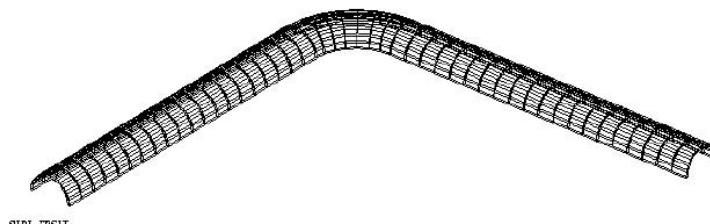
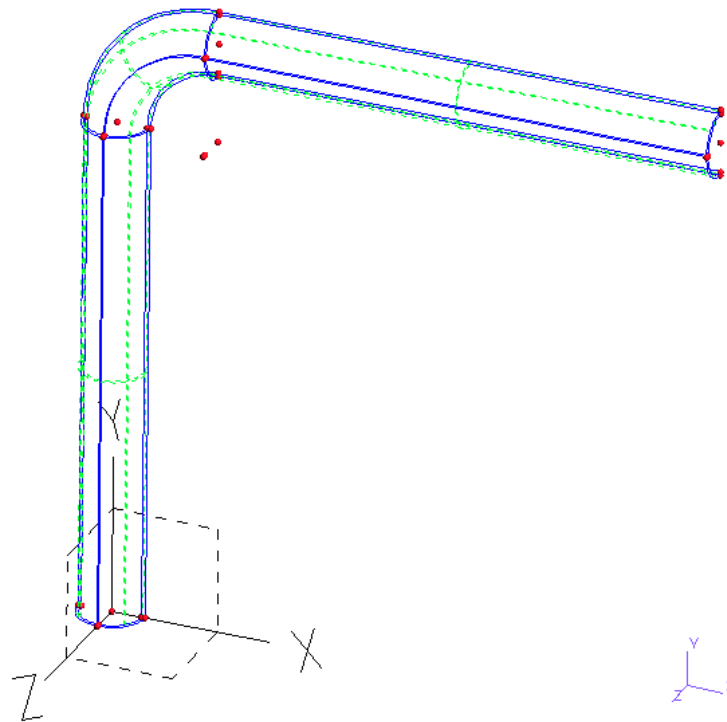
16.1 Valeurs testées

Chargement	Valeur testée	Référence	Aster	% différence
Force concentrée Fy en B	Déplacement en B Dx	-2.65E-02	-2.65E-02	0
	Déplacement en B Dy	0.731E-01	0.731E-01	0
Pression interne	Déplacement en B Dx	-2.622E-01	-2.622E-01	0
	Déplacement en B Dy	3.967E-01	3.967E-01	0
Température à l'instant 10s	Température en Al1	70	70	0

17 Modélisation H

17.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation en éléments volumiques, le maillage étant obtenu à l'aide de GMSH. La modélisation est en tous points identique à la modélisation G. Les mailles linéaires générées par GMSH sont transformées en mailles quadratiques par la macro-commande `PRE_GMSH`.



17.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 5029
Nombre de mailles et types : 188 HEXA20
658 PENTA15
1136 QUAD8
28 TRIA6

17.3 Fonctionnalités testées

Pour le cas de charge thermique, l'étude nécessite un premier calcul thermique transitoire suivi d'un calcul mécanique.

Afin d'utiliser les possibilités de reprise d'un calcul, on fera deux exécutions successives et couplées avec *Aster*. Dans la première exécution, on fera la résolution des différents cas de charge, dans la seconde des post-traitements sur le cas de charge thermo-mécanique.

Les principales étapes de la **première** exécution avec *Aster* seront :

- Lecture du maillage (`PRE_GMSH`) et génération du maillage en éléments quadratiques (mot-clé `MODI_QUAD`). Appel à `LIRE_MALLAGE` pour lire ce maillage quadratique. On peut utiliser `DEFI_GROUP` pour renommer les groupes de mailles selon la correspondance :

```
TUYAU      <=> GM10000
EFOND      <=> GM10005
ENCAST     <=> GM10001
SYMETRIE   <=> GM10002
SURFINT    <=> GM10004
SURFEXT    <=> GM10003
```

- Définition des éléments finis utilisés (`AFFE_MODELE`). On définira un modèle pour le calcul thermique et un modèle mécanique.
- Définition et affectation du matériau (`DEFI_MATERIAU` et `AFFE_MATERIAU`). Les caractéristiques thermiques et mécaniques sont identiques sur toute la structure.
- Définition des conditions aux limites thermiques (`DEFI_FONCTION` et `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). On considère que la tuyauterie est calorifugée et donc on applique une condition d'échange nul sur la surface extérieure.
- Résolution du problème thermique (`THER_LINEAIRE`). Le calcul du champ de température s'effectue pour les deux instants du transitoire (5. et 10. s).
- Définition des trois cas de charge mécaniques : conditions aux limites et chargement mécanique ou thermique (`AFFE_CHAR_MECA`) :
 - un effort `FY` dirigé selon l'axe `Y` et appliqué à la section `B`, (utiliser `FORCE_FACE`. La valeur de l'effort surfacique de résultante `Fy` peut être calculée dans *Aster* à l'aide de `DEFI_VALEUR`),
 - une pression interne,
 - le transitoire thermique précédemment calculé,
 - La tuyauterie est encastree en sa base (`Ae1`, `Ai1`, `Ae2`, `Ai2`), sur tous les nœuds situés dans le plan d'équation `Y=0`. Pour le cas de charge thermique, la section `B` de la tuyauterie est aussi encastree.

- Résolution pour les différents cas de charge du problème mécanique et calcul du champ de contraintes aux nœuds par élément (3 appels à MECA_STATIQUE)
- A l'aide de CALC_ELEM, calcul des contraintes par éléments extrapolées aux nœuds (SIEF_ELNO_ELGA) et des contraintes équivalentes de Von Mises (EQUI_ELNO_SIGM).
- Impression des résultats (IMPR_RESU).
 - On imprimera sous forme listing d'une part le déplacement sur la section B, et d'autre part les valeurs maximales du tenseur de contraintes, pour les cas de charge mécaniques.
 - On imprimera pour le calcul thermo-mécanique, les déplacements, et la composante VMIS sur champ EQUI_ELNO_SIGM au format GMSH.

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

- Création d'une table par extraction de valeurs sur un chemin (INTE_MAIL_3D et POST_RELEVE_T).
- On extraira des valeurs de température et de déplacement pour un azimuth au niveau de l'entrée de coude pour le cas de charge thermo-mécanique. L'azimut est défini par le chemin d'extrémités (0. 3. 0.1) et (0. 3. 0.2).
- Impression de courbes (IMPR_COURBE).
- On imprimera au format AGRAF l'évolution de la température et de la composante suivant Y du champ de déplacement, le long de la l'azimut précédent. On pourra ensuite visualiser ces courbes au moyen de AGRAF.

18 Résultats de la modélisation H

18.1 Valeurs testées

Chargement	Valeur testée	Référence (3D mod. C)	Aster	% différence
Force concentrée Fy en B	Déplacement en B Dx	-2.94E-02	-2.94E-02	0
	Déplacement en B Dy	1.056E-01	1.056E-01	0
Pression interne	Déplacement en B Dx	-2.734E-01	-2.734E-01	0
	Déplacement en B Dy	4.41E-01	4.410E-01	0
Température à l'instant 10s	Température en A11	70	70	0

19 Synthèse des résultats

Ce test n'a pas pour but de valider des fonctionnalités, mais est utilisé pour la formation. Toutefois, il est intéressant de comparer certaines modélisations du même problème. On constate que les écarts restent relativement faibles (5% d'écart au maximum entre 3D (éléments quadratiques), coque et tuyau).