FORMA11 - Travaux pratiques de la formation « Analyse dynamique » : analyse modale

Résumé :

Ces tests correspondent aux travaux pratiques de la formation dynamique de *Code_Aster*. Il s'agit de quatre géométries, constituée toute d'un matériau élastique linéaire pour lesquelles on effectue une analyse modale : recherche des fréquences propres et des modes associés.

Les modélisations utilisées sont les suivantes :

- Modélisation A : Recherches des modes multiples d'une poutre (POU_D_E)
- Modélisation B : Recherche des modes de corps rigides d'une sphère (3D)
- Modélisation C : Utilisation de l'opérateur CALC_MODES pour l'analyse d'une tour réfrigérante (DKT),

Les énoncés des travaux pratiques de la formation dynamique sont présentés dans ce document :

- TP1 : Recherches des modes multiples d'une poutre,
- TP2 : Recherche des modes de corps rigides,
- TP3 : Utilisation de la macro-commande CALC_MODES.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Modélisation A

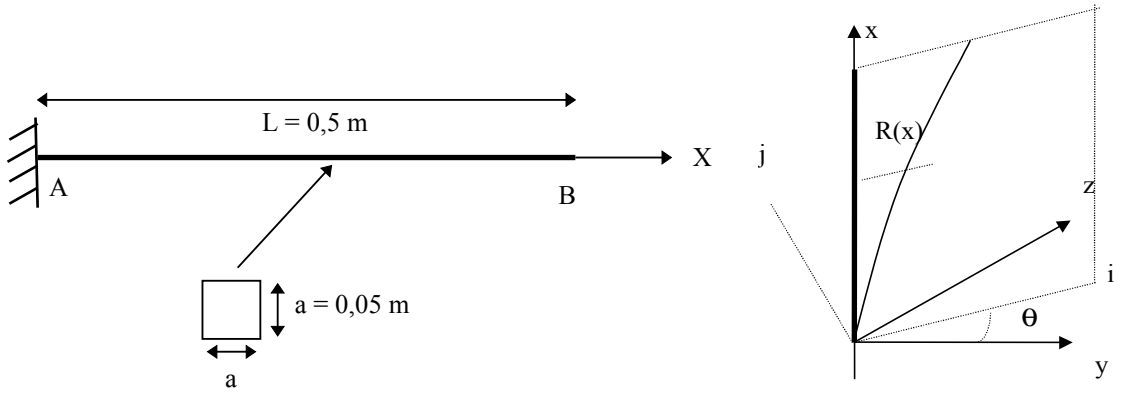
1.1 Description du problème

1.1.1 Objectif

L'objectif de cette modélisation est de déterminer les 11 premières fréquences propres de la poutre encastrée, en présence de modes multiples, en utilisant les quatre méthodes suivantes :

- Méthode de SORENSEN,
- Méthode de LANCZOS,
- Méthode de BATHE et WILSON
- Méthode d'itération inverse

1.1.2 Géométrie



1.1.3 Propriétés des matériaux

Le matériau est élastique isotrope linéaire :

- le module d'Young $E=210\,000.10^6\,N/m^2$,
- le coefficient de Poisson $\nu=0.3$,
- la masse volumique $\rho=7800\,Kg/m^3$

1.1.4 Conditions aux limites et chargement

La poutre est encastrée au point A .

1.2 Caractéristiques de la modélisation

1.2.1 Maillage

Le maillage filaire pourra être construit interactivement à l'aide de Salomé. Il suffit de définir les points A , B puis la droite AB . La taille des éléments est identique. Dans le module de maillage de Salomé, on pourra déclarer, en se basant sur la géométrie, comme groupe de nœud le point A , puis comme groupe de mailles la droite AB . Ensuite le maillage sera sauvegardé au format MED.

Les éléments de poutre droite d'Euler (POU_D_E) seront retenus pour la modélisation.

Le maillage est constitué de 10 SEG2 et 11 nœuds.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1.2.2 Fichier de commandes Aster

Les principales étapes du calcul avec *Aster* seront :

Lecture du maillage au format MED (LIRE_MAILLAGE ('FORMAT='MED')).
Définition des éléments finis utilisés (AFFE_MODELE). On affectera au groupe de mailles composant la poutre la modélisation POU_D_E.
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 poutre est la même.
Affectation des conditions aux limites (AFFE_CHAR_MECA).
Calcul des matrices rigidités élémentaires (CALC_MATR_ELEM (OPTION='RIGI_MECA')).
Calcul des matrices de masses élémentaires (CALC_MATR_ELEM (OPTION='MASS_MECA')).
Numérotation des inconnues du système d'équations linéaires (NUME_DDL)
Assemblage des matrices élémentaires de masse et de rigidité (ASSE_MATRICE).

Remarque : pour aller plus vite on peut utiliser la macro ASSEMBLAGE pour construire les matrices !

Question n°1 :

- Calculer les 11 plus petites fréquences propres et les premiers modes associés (CALC_MODES [U4.52.02]).
- Imprimer les modes propres (IMPR_RESU) au format MED pour une visualisation dans Salomé.

Question n°2 :

- Calculer les fréquences propres et les premiers modes associés présents dans la bande de fréquences $0\,Hz$ et $6000\,Hz$, avec les quatre méthodes SORENSEN, LANCZOS, BATHE, QZ (CALC_MODES [U4.52.02], mot-clé facteur SOLVEUR_MODAL=_F(METHODE=...)) puis par itérations inverses (mot-clé simple OPTION='AJUSTE').
- Imprimer les modes propres (IMPR_RESU) au format MED pour une visualisation dans Salomé.

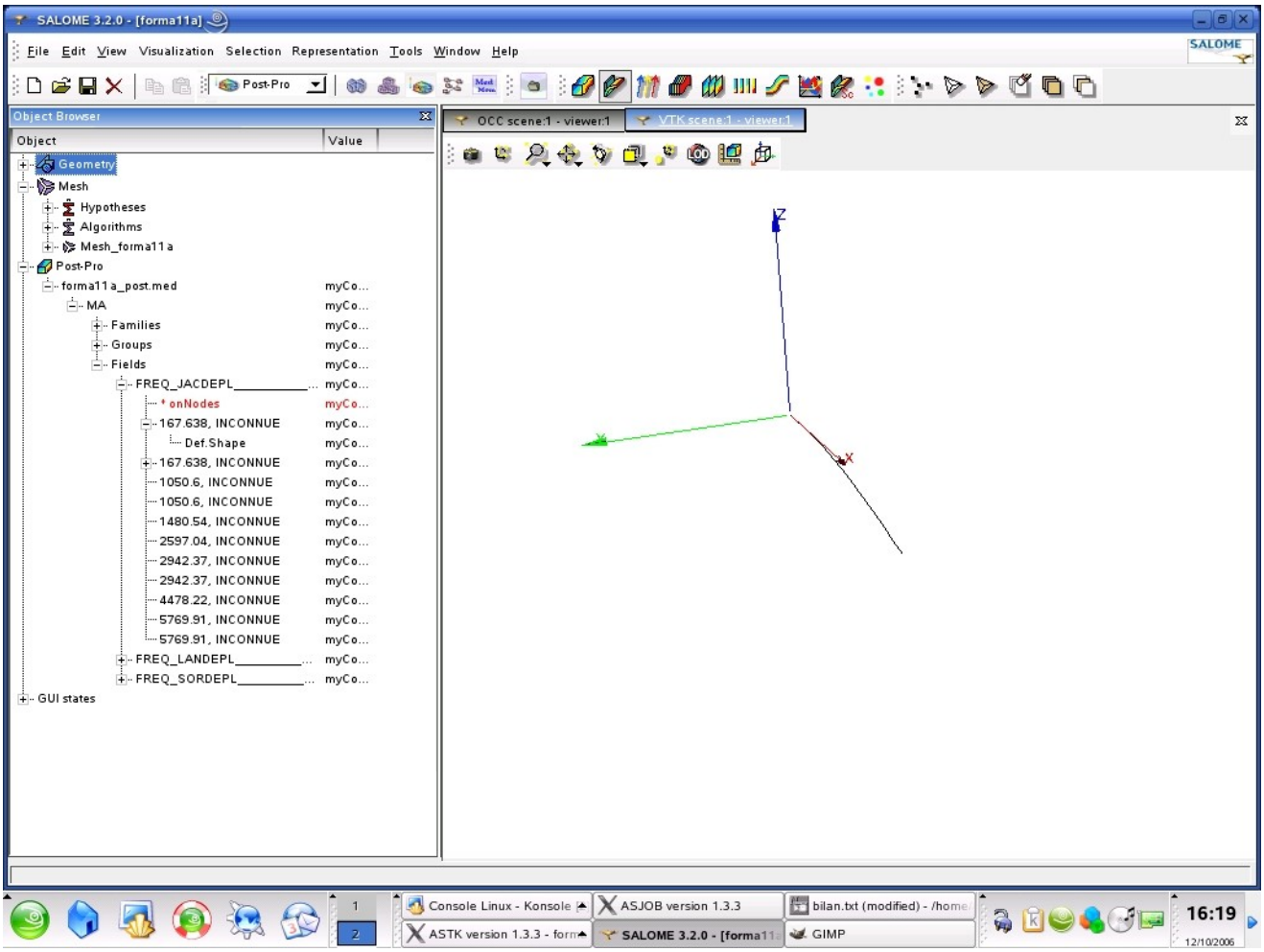
1.3 Aide pour le Post-traitement sous Salomé

Les différentes étapes de visualisation des déformées modales avec Salomé sont les suivantes :

Lancer Salome sous linux
Cliquer sur File/open et sélectionner la base Salome (hdf) contenant la géométrie et le maillage.
Lancer le module de post-traitement Post-Pro
Cliquer sur File/Import/MED file et sélectionner le fichier MED contenant les modes propres à visualiser
Déployer complètement dans l'Object Browser l'arborescence de la ligne Post-Pro afin de voir en détails tous les champs de déplacements.
Cliquer sur l'un des champs et avec le bouton droit de la souris cliquer sur Deformed Shape. (*la déformée modale s'affiche*).
Déployer la ligne contenant le champ visualisé, ensuite cliquer sur Def. Shape et ensuite cliquer sur le

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

bouton droit de la souris et sélectionner `sweep` pour animer la déformée.



1.4 Remarques

La bonne pratique consiste à utiliser l'option '`BANDE`' plutôt que '`PLUS_PETITE`' ou '`CENTRE`'.

Le nombre de fréquences est déterminé automatiquement par le test de Sturm et ainsi toutes les multiplicités sont prises en compte.

La méthode de '`SORENSEN`' est la plus rapide (malgré son caractère itératif qui permet d'obtenir une meilleure précision)

On projette sur un espace de plus petite taille (par rapport à '`TRI_DIAG`' et à '`JACOBI`') et on ne fait qu'une factorisation (par rapport aux algorithmes des puissances inverses mis en œuvre quand on utilise `OPTION='AJUSTE'/'SEPARE'/'PROCHE'`).

En présence de modes multiples, la moindre modification du paramétrage de la méthode modale (ou de la tripaille associée `NUME_DDL`…) produit des vecteurs propres différents.

Mais ils engendrent toujours le même espace propre,
Pour s'en convaincre on peut visualiser les déformées modales ou sommer les masses modales effectives.

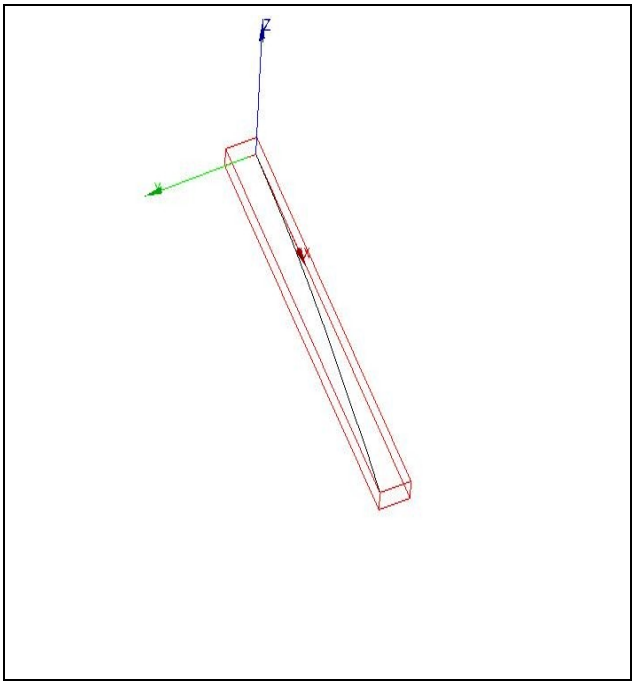
Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	TRI_DIAG		SORENSEN	
	MASS_EFFE_DY	MASS_EFFE_DZ	MASS_EFFE_DY	MASS_EFFE_DZ
Mode 1	3.16920	2.80830	1.13915	4.83834
Mode 2	2.80672	3.17077	4.83834	1.13915
TOTAL	5.97592	5.97907	5.97749	5.97749

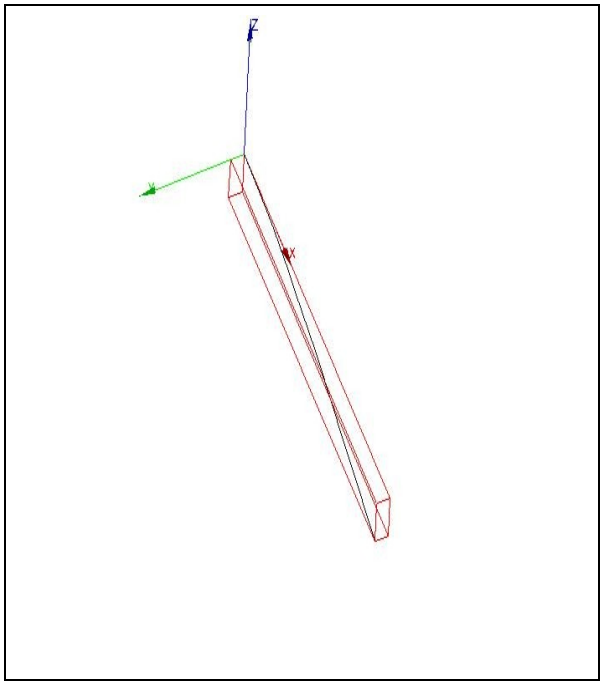
1.5 Grandeurs testées et résultats

Les résultats obtenus avec la méthode de SORENSEN sont présentés dans le tableau, et sur les figures ci-dessous

Mode	Fréquence en Hz (Méthode SORENSEN)
1	1.67638E+02
2	1.67638E+02
3	1.05060E+03
4	1.05060E+03
5	1.48054E+03
6	2.59704E+03
7	2.94237E+03
8	2.94237E+03
9	4.47822E+03
10	5.76991E+03
11	5.76991E+03

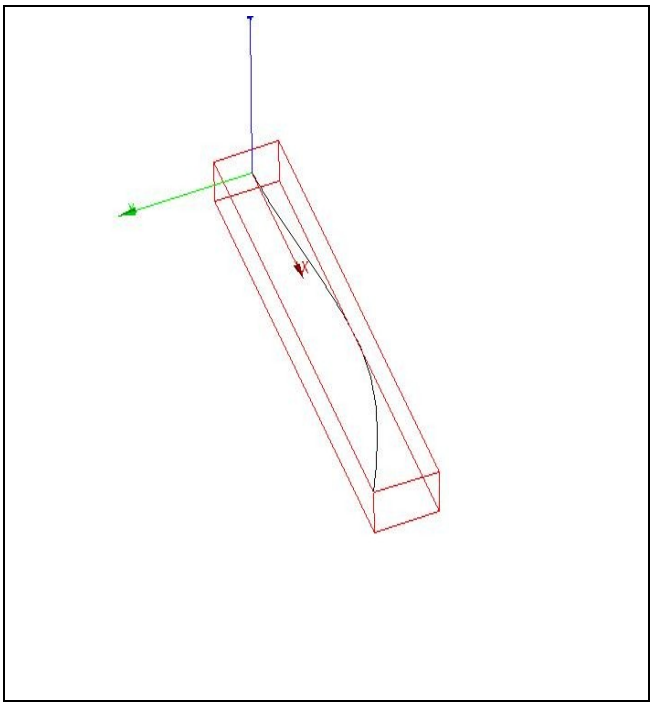


Déformée modale ($167.638\,Hz$ **)**

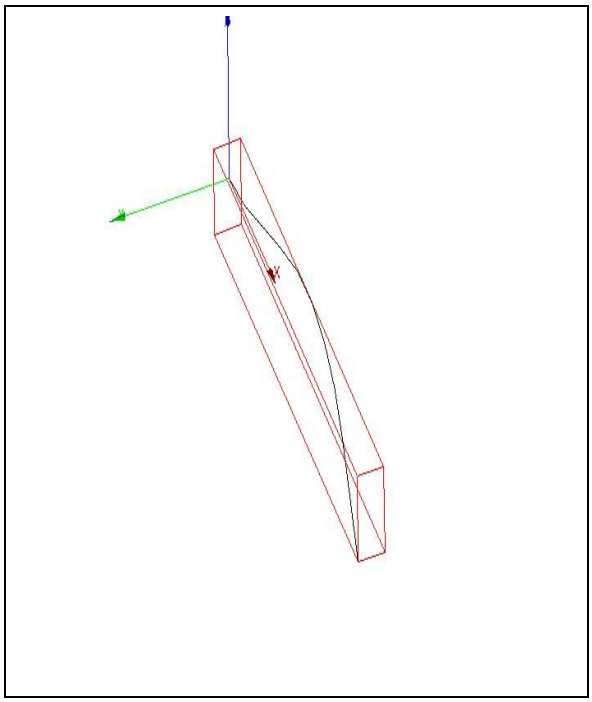


Déformée modale ($167.638\,Hz$ **)**

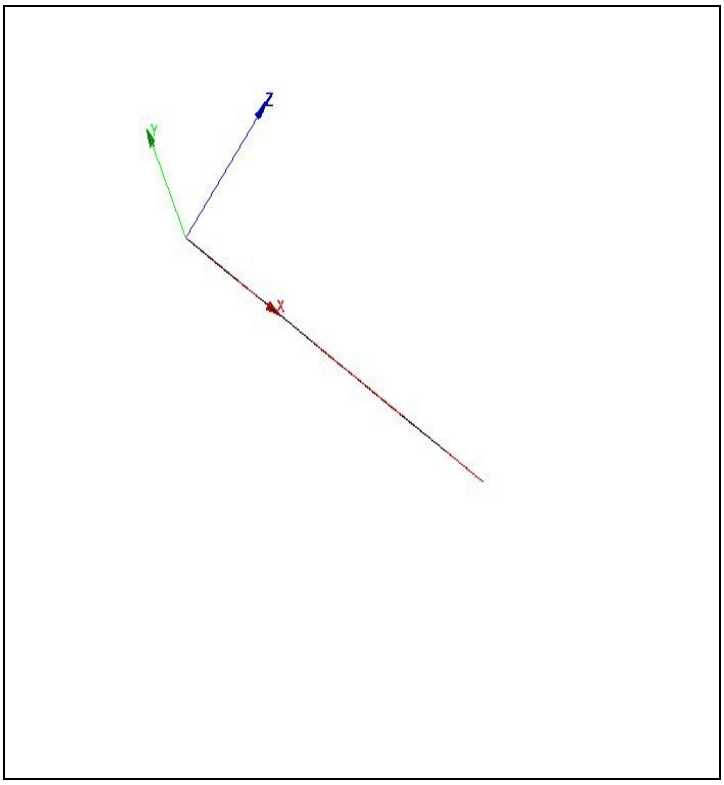
Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



Déformée modale ($1050.60\,Hz$ **)**



(Déformée modale $1050.60\,Hz$ **)**



Déformée modale ($1480.54\,Hz$ **)**

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Modélisation B

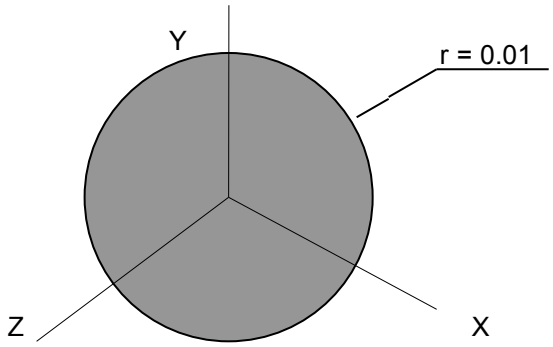
2.1 Description du problème

2.1.1 Objectif

L'objectif de cette modélisation est de déterminer pour une structure de type sphère en libre libre, (présence de modes multiples de corps rigide) :

- Les fréquences propres situées dans une bande de fréquences avec la méthode de SORENSEN,
- Les fréquences propres situées dans une bande de fréquences avec la méthode de LANCZOS avec ou sans mode rigide (OPTION=MODE_RIGIDE),
- Les 16 plus petites fréquences propres avec la méthode de SORENSEN

2.1.2 Géométrie



2.1.3 Propriétés des matériaux

Le matériau est élastique isotrope linéaire :

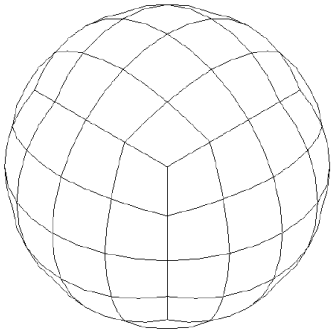
- le module d'Young $E=10^8 N/m^2$,
- le coefficient de Poisson $\nu=0.3$,
- la masse volumique $\rho=10^4 kg/m^3$

2.1.4 Conditions aux limites et chargement

Aucune

2.2 Caractéristiques de la modélisation

2.2.1 Caractéristiques du maillage



Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Le maillage comporte 160 mailles HEXA20, et 813 nœuds.
Les éléments volumiques (3D) seront retenus pour la modélisation.

2.2.2 Commandes *Aster*

Les principales étapes du calcul avec *Aster* seront :

Lecture du maillage (LIRE_MAILLAGE).
Définition des éléments finis utilisés (AFFE_MODELE).
Définition et affectation du matériau (DEFI_MATERIAU et AFFE_MATERIAU).
Les caractéristiques mécaniques sont identiques sur toute la structure.
Calcul des matrices rigidités élémentaires (CALC_MATR_ELEM (OPTION='RIGI_MECA')).
Calcul des matrices de masses élémentaires (CALC_MATR_ELEM (OPTION='MASS_MECA')
Numérotation des inconnues du système d'équations linéaires (NUME_DDL)
Assemblage des matrices élémentaires de masse et de rigidité (ASSE_MATRICE).

Remarque : pour aller plus vite on peut utiliser la macro ASSEMBLAGE pour construire les matrices !

Question n°1 :

- Calculer avec la méthode de SORENSEN (sous le mot-clé facteur SOLVEUR_MODAL), les fréquences situées dans la bande de fréquence $(0.Hz, 2880Hz)$ ainsi que les modes associés (CALC_MODES).
- Si le calcul échoue on pourra étendre la bande de fréquences sur une marge légèrement négative.

- Imprimer les modes propres (IMPR_RESU) au format MED pour une visualisation dans Salomé.

Question n°2 :

- Calculer avec la méthode de LANCZOS avec ou sans option MODE_RIGIDE les fréquences situées dans la bande de fréquence $(0.Hz, 2880Hz)$ ainsi que les modes associés (CALC_MODES).

Question n°3 :

- Calculer avec la méthode de SORENSEN les 16 plus petites fréquences ainsi que les modes associés (CALC_MODES). On pourra utiliser le paramètre PREC_SHIFT (sous le mot-clé facteur CALC_FREQ) pour contourner le problème des fréquences nulles.

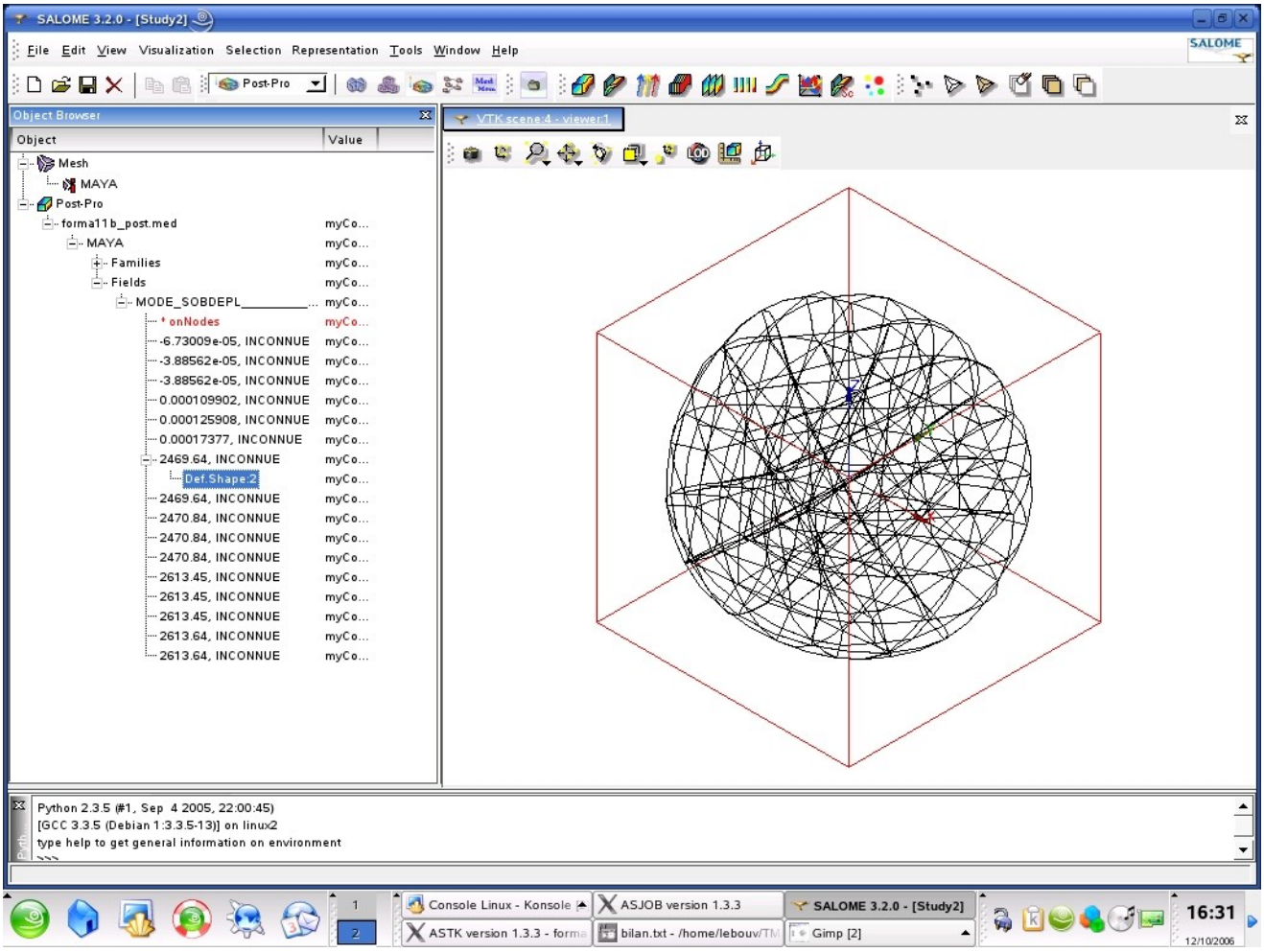
2.3 Aide pour le post-traitement sous Salomé

Les différentes étapes de visualisation des déformées modales avec Salomé sont les suivantes :

Lancer Salome sous linux
Lancer le module de maillage Mesh/New
Cliquer sur File/Import/MED file et sélectionner le fichier med contenant le maillage
Lancer le module de post-traitement Post-Pro
Cliquer sur File/Import/MED file et sélectionner le fichier med contenant les modes propres à visualiser

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Déployer complètement dans l'Object Browser l'arborescence de la ligne Post-Pro afin de voir en détails tous les champs de déplacements.
Cliquer sur l'un des champs et avec le bouton droit de la souris cliquer sur Deformed Shape. (*la déformée modale s'affiche*).
Déployer la ligne contenant le champ visualisé, ensuite cliquer sur Def. Shape et ensuite cliquer sur le bouton droit de la souris et sélectionner sweep pour animer la déformée.



2.4 Remarques

La factorisation des matrices shiftées $(K-\sigma)^{-1}=LDL^T$ régie par le paramétrage : NMAX_ITER_SHIFT, SOLVEUR/NPREC[U4.50.01] et PREC_SHIFT, ne peut s'effectuer que si celles-ci sont régulières.

Cela pose souvent problème lorsque la magnitude des termes de K est grande devant celle des termes de M et que σ est une bonne valeur propre approchée. La politique de l'opérateur est d'émettre une ALARME lorsqu'il s'agit d'un test de Sturm et une ERREUR_FATALE lorsqu'il s'agit de la matrice de travail de l'opérateur. En cas de problème, on peut toujours changer d'option ou de shift.

La détection de modes de corps rigide est souvent problématique pour les solveurs modaux classiques ! La bonne pratique consiste à utiliser la méthode de SORENSEN en utilisant une bande de fréquences dont la borne inférieure est nulle, voire légèrement négative. Le solveur normalement les

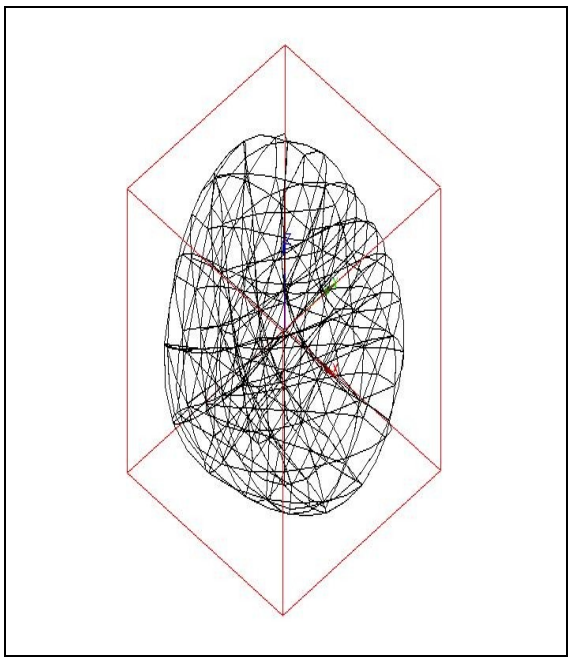
Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

capture sans aucun problème (il s'agit juste de modes multiples un peu particuliers). A défaut, avec TRI_DIAG, l'option MODE_RIGIDE est préconisée.

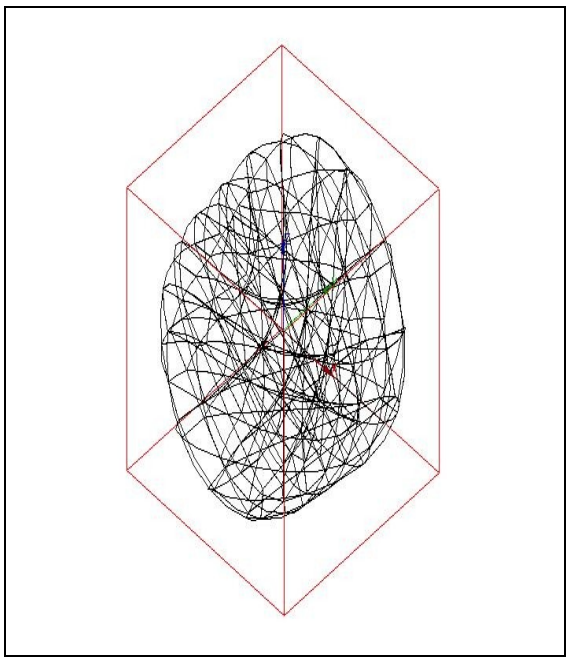
2.5 Grandeurs testées et résultats

Les résultats obtenus avec la méthode de SORENSEN et la méthode de LANCZOS avec et sans l'option OPTION= MODE_RIGIDE sont présentés dans le tableau ci-dessous.

CALC_MODES					
Méthode Sorensen (METHODE ='SORENSEN')		**Méthode de Lanczos (avec l'option MODE_RIGIDE)**		**Méthode de Lanczos (sans l'option MODE_RIGIDE)**	
Mode	**Fréquence**	**Mode**	**Fréquence**	**Mode**	**Fréquence**
5	-3.88562E-05	6	0.00000E+00	4	1.22874E-04
4	-3.88562E-05	5	0.00000E+00	5	2.70602E-04
3	-6.73009E-05	4	0.00000E+00	3	-5.03634E-04
2	1.09902E-04	3	0.00000E+00	2	-5.69081E-04
6	1.25908E-04	2	0.00000E+00	6	4.46762E-03
1	1.73770E-04	1	0.00000E+00	7	2.46964E+03
7	2.46964E+03	7	2.46964E+03	8	2.46964E+03
8	2.46964E+03	8	2.46964E+03	9	2.47084E+03
9	2.47084E+03	9	2.47084E+03	10	2.47084E+03
10	2.47084E+03	10	2.47084E+03	11	2.47084E+03
11	2.47084E+03	11	2.47084E+03	12	2.61345E+03
12	2.61345E+03	12	2.61345E+03	13	2.61345E+03
13	2.61345E+03	13	2.61345E+03	14	2.61345E+03
14	2.61345E+03	14	2.61345E+03	15	2.61364E+03
15	2.61364E+03	15	2.61364E+03	16	2.61364E+03
16	2.61364E+03	16	2.61364E+03	17	3.48770E+03

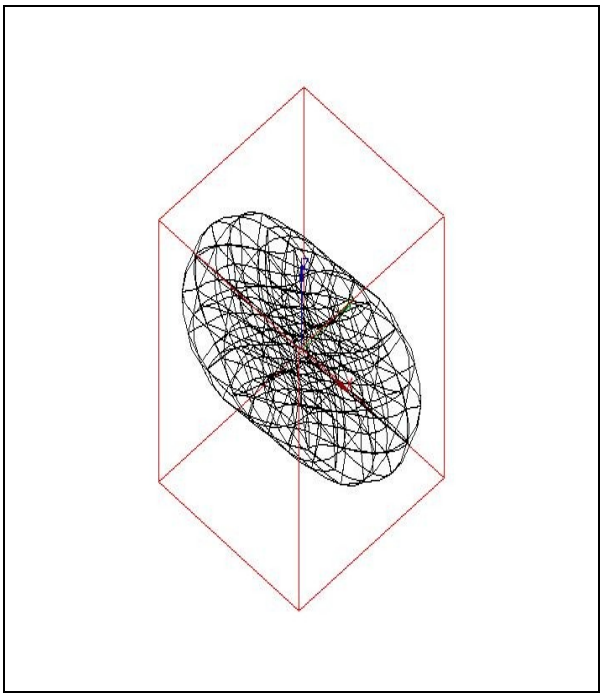


Déformée modale (2469.64 *Hz* **)**



Déformée modale (2469.64 *Hz* **)**

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



Déformée modale (2470.84 *Hz* **)**

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation C

3.1 Description du problème

L'objectif de cette modélisation est l'utilisation de la macro-commande CALC_MODES [U4.52.02] avec l'option 'BANDE' découpée en plusieurs sous-bandes. Cette commande permet de lancer une succession de calculs de modes propres réels.

Les actions suivantes sont réalisées :

- Obtention des modes par itérations simultanées, dans des bandes de fréquences spécifiées,
- Application d'une norme, filtrage selon un critère de valeur de paramètre modal supérieure à un certain seuil et enfin concaténation des structures de données calculées en une seule.

Les modes sont calculés par la commande CALC_MODES [U4.52.02] avec l'option 'BANDE' et normés par la commande NORM_MODE [U4.52.11]. Les modes calculés sont filtrés et concaténés au moyen de la commande EXTR_MODE [U4.52.12].

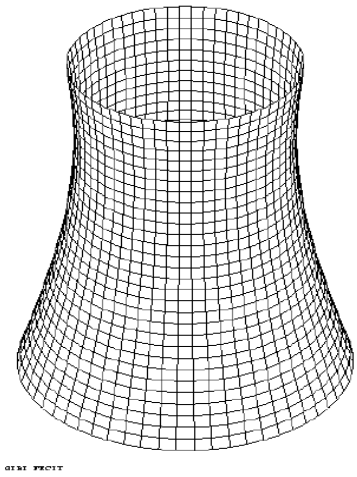
3.1.1 Objectif

L'objectif de cette modélisation est :

- De « peser » le modèle éléments finis et d'évaluer le nombre de modes,
- D'utiliser la macro-commande CALC_MODES avec l'option 'BANDE' découpée en plusieurs sous-bandes pour calculer les fréquences propres.

3.1.2 Géométrie

On pourra récupérer le maillage dans le répertoire des cas tests.
L'épaisseur de la coque est de $e=0,3045\,m$



3.1.3 Propriétés Matériaux

Le matériau est élastique isotrope linéaire :

- le module d'Young $E=2,76.10^{10}\,N/m^2$,
- le coefficient de Poisson $\nu=0,166$,
- la masse volumique $\rho=2244\,Kg/m^3$

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.1.4 Conditions aux limites et chargement

La tour est encastrée à sa base.

3.2 Caractéristiques de la modélisation

3.2.1 Caractéristiques du maillage

Le maillage est composé de 1860 QUAD4 et 1860 nœuds

La tour est modélisée avec des éléments de coque DKT

3.2.2 Commandes *Aster*

Les principales étapes du calcul avec *Aster* seront :

Lecture du maillage (LIRE_MAILLAGE).
Définition des éléments finis utilisés (AFFE_MODELE). On affectera la modélisation DKT à l'ensemble des éléments de la tour.
Définition et affectation du matériau (DEFI_MATERIAU et AFFE_MATERIAU).
Les caractéristiques mécaniques sont identiques sur toute la structure.
Affectation des caractéristiques des éléments de coque (AFFE_CARA_ELEM).
L'épaisseur de tous les éléments est la même.
Affectation des conditions aux limites (AFFE_CHAR_MECA).
Calcul des matrices rigidités élémentaires (CALC_MATR_ELEM (OPTION='RIGI_MECA')).
Calcul des matrices de masses élémentaires (CALC_MATR_ELEM (OPTION='MASS_MECA').
Numérotation des inconnues d'un système d'équations linéaires (NUME_DDL)
Assemblage des matrices élémentaires de masse et de rigidité (ASSE_MATRICE).

Remarque : pour aller plus vite on peut utiliser la macro ASSEMBLAGE pour construire les matrices !

Question n°1 :

- Peser le modèle (POST_ELEM) et évaluer le nombre de mode dont la fréquence est inférieure à $4\,Hz$ (INFO_MODE).

Question n°2 :

- Calculer les fréquences propres et les premiers modes associés présent dans la bande de fréquence $0.Hz$ à $4\,Hz$ (CALC_MODES)
- Normaliser avec la norme infinie, sur toutes les composantes des nœuds physiques tout en requérant le calcul des masses effectives unitaires (NORM_MODE, EXTR_MODE).
- Imprimer les modes propres (IMPR_RESU) au format MED pour une visualisation dans Salomé.

Question n°3 :

- Calculer les fréquences propres en regroupant les trois opérations CALC_MODES, NORM_MODE et EXTR_MODE en une (en coupant en 2 intervalles) avec CALC_MODES et l'option 'BANDE' découpée en plusieurs sous-bandes.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Question n°4 :

- Calculer les fréquences propres en regroupant les trois opérations CALC_MODES, NORM_MODE et EXTR_MODE en une (en coupant en 4 intervalles) avec CALC_MODES et l'option 'BANDE' découpée en plusieurs sous-bandes.

Question n°5 :

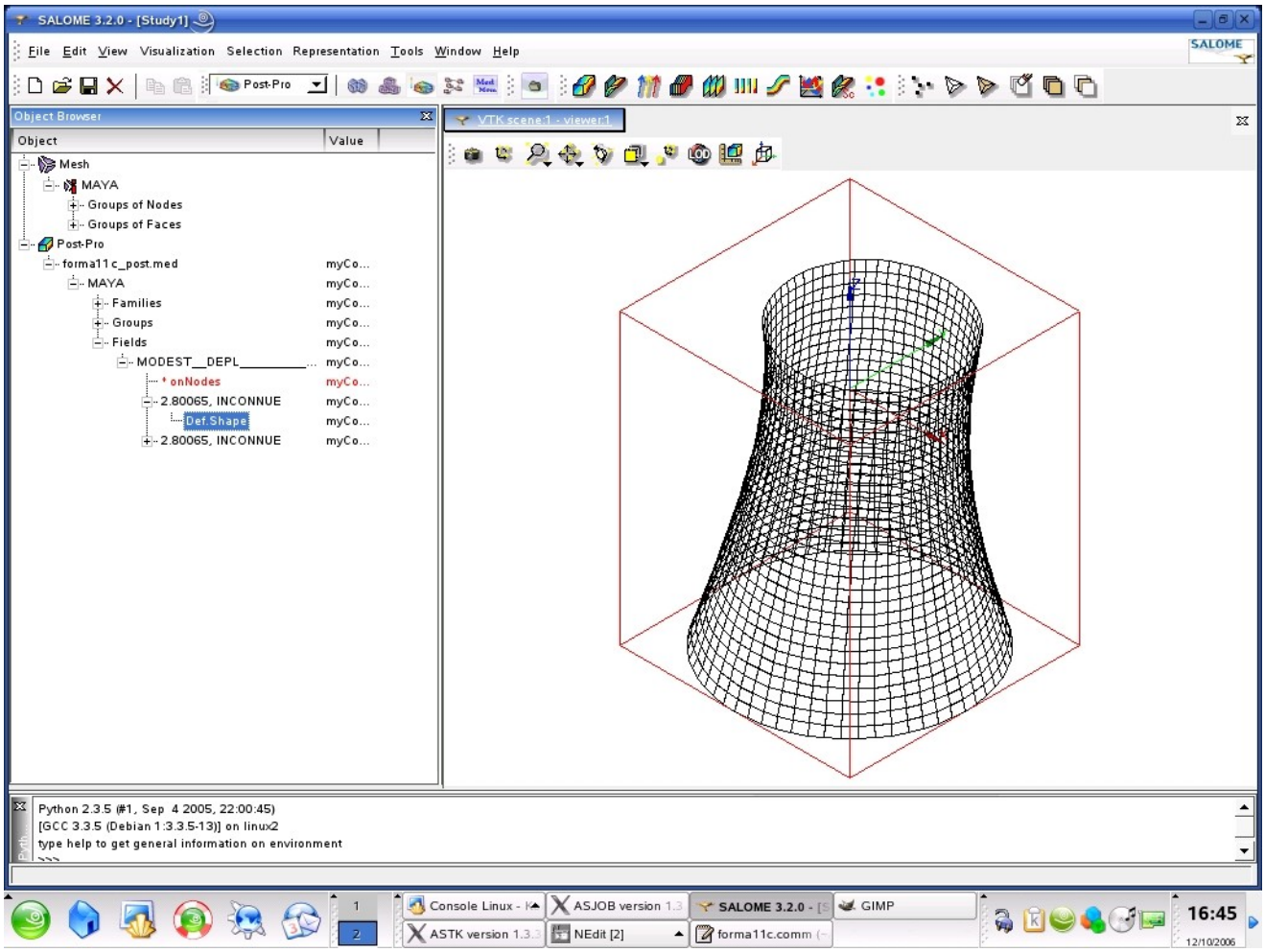
- On réalise la même chose que celle demandée dans la question 4 mais avec la méthode de LANCZOS.

3.3 Aide pour le post-traitement sous Salomé

Les différentes étapes de visualisation des déformées modales avec Salomé sont les suivantes :

Lancer Salome sous linux
Lancer le module de maillage Mesh/New
Cliquer sur File/Import/MED file et sélectionner le fichier med contenant le maillage
Lancer le module de post-traitement Post-Pro
Cliquer sur File/Import/MED file et sélectionner le fichier med contenant les modes propres à visualiser
Déployer complètement dans l'Object Browser l'arborescence de la ligne Post-Pro afin de voir en détails tous les champs de déplacements.
Cliquer sur l'un des champs et avec le bouton droit de la souris cliquer sur Deformed Shape. (*la déformée modale s'affiche*).
Déployer la ligne contenant le champ visualisé, ensuite cliquer sur Def. Shape et ensuite cliquer sur le bouton droit de la souris et sélectionner sweep pour animer la déformée.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



3.4 Remarques

Les bonnes pratiques : il faut au préalable :

Peser son modèle avec POST_ELEM,
Évaluer le spectre avec INFO_MODE.

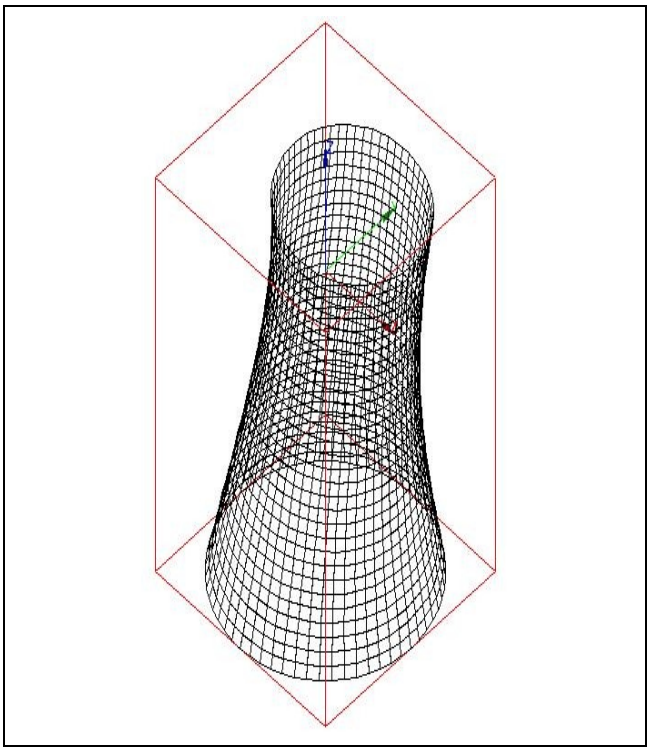
La commande CALC_MODES, avec l'option 'BANDE' découpée en plusieurs sous-bandes, est plus économique pour rechercher un grand spectre.

A condition de ne pas trop le saucissonner,
Il faut vérifier la concordance des bouts de spectre identifiés,
Gain de temps peut être très important : 500% ,
On peut facilement et automatiquement y adjoindre d'autres opérations : normalisation, filtrage, concaténation de structures de données.

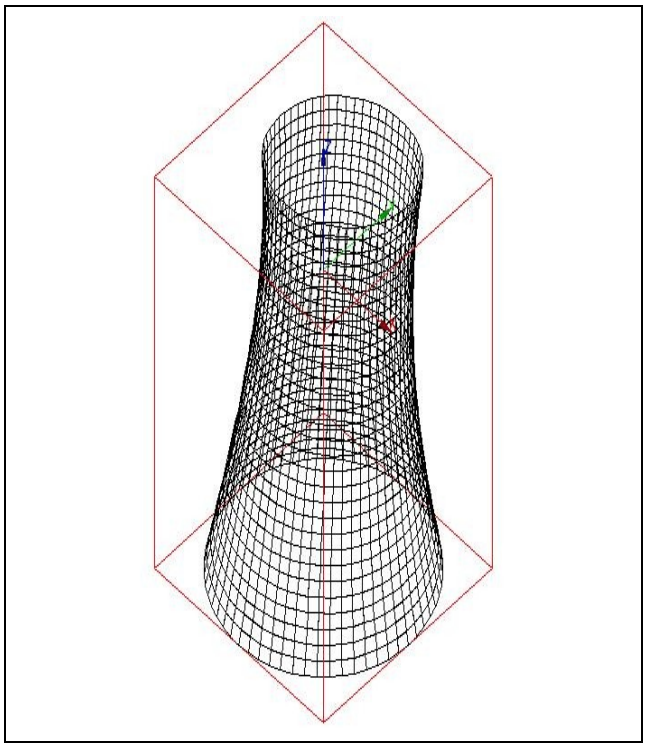
3.5 Grandeurs testées et résultats

Mode	Fréquence en Hz
1	$2.80065\ Hz$
2	$2.80065\ Hz$

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



Déformée modale (2.80065 *Hz*)



Déformée modale (2.80065 *Hz*)

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)