



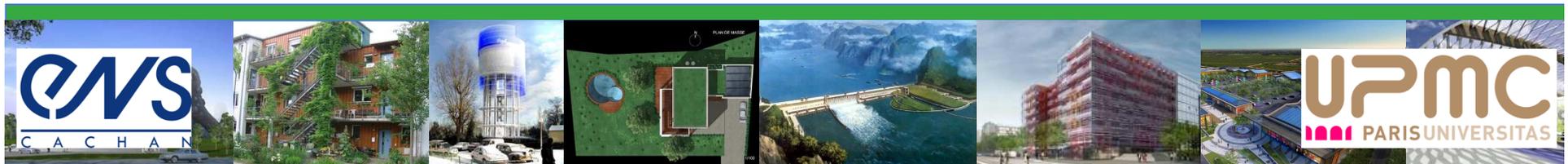
# Mise au point d'un modèle simplifié pour l'étude du comportement dynamique de l'enceinte de confinement sous chargement sismique

Thomas CATTEROU

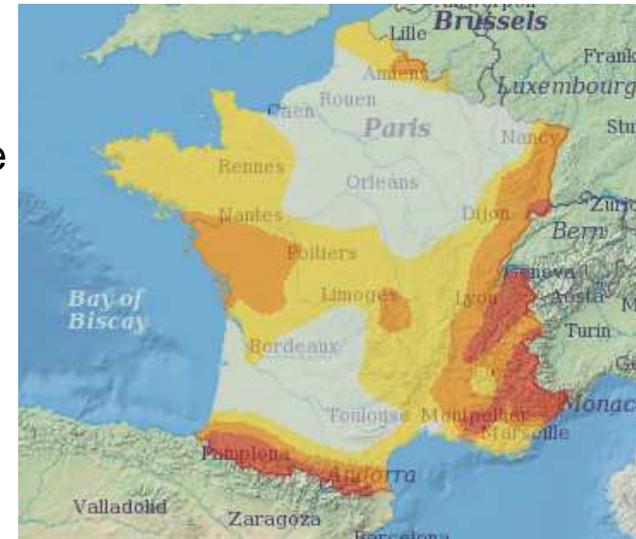
Stage de M1 de l'ENS Cachan réalisé à  
l'**IRSN**

Encadrant Georges NAHAS

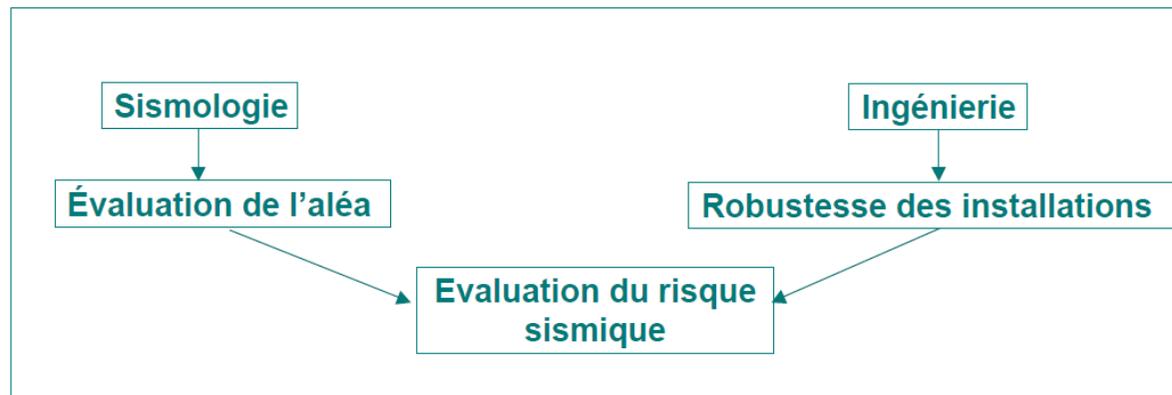
Club CAST3M jeudi 28 novembre 2013



- Le risque sismique en France est modéré, mais pas négligeable, Lors du dimensionnement des centrales, une étude des risques sismiques est faite afin de s'assurer qu'aucun dégâts ne puisse affecter une des fonctions de sureté de l'installation.
- Un nouvel examen de chaque installation est réalisé tout les 10 ans qui tient compte de l'avancée de la recherche en matière de modélisation.



*Nouveau zonage sismique en vigueur depuis le 1<sup>er</sup> mai 2011 pour les bâtiments courants*



## Documents de référence

**RFS 2001 -01**

Détermination du SMHV  
(séismes maximaux  
historiquement vraisemblables)

Majoration du séisme  
 $\text{Intensité}_{(SMS)} = \text{Intensité}_{(SMHV)} + 1$

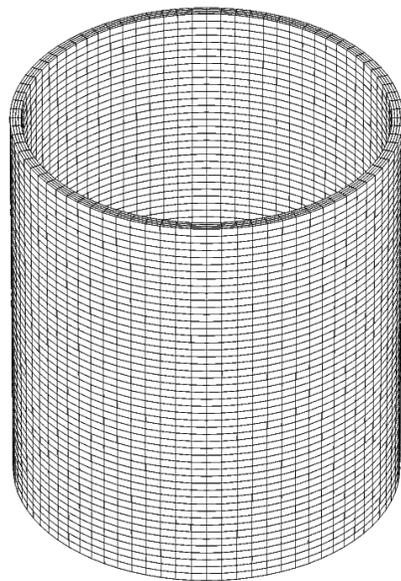
Détermination d'un spectre de sol et  
calcul sur ouvrage

**Guide  
ASN/2/01**

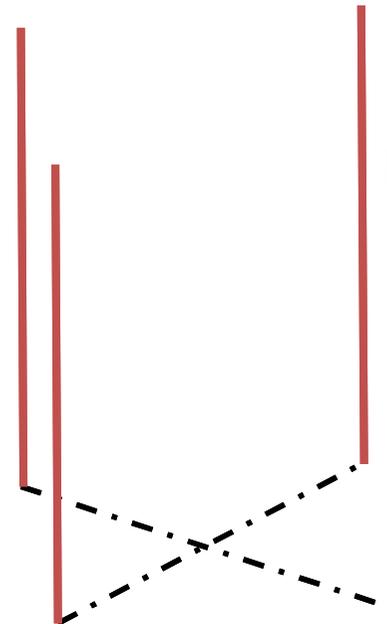
- Modèle tridimensionnel
- Prise en compte de l'ISS
- Prise en compte des modes locaux
- Couplage éventuel des directions de sollicitations
- Effet des équipements, de l'hydrodynamique

Les modèles volumiques décrivent très finement la structure mais les calculs numériques sont très lourds.

- L'idée est donc de trouver un modèle simplifié permettant de donner des résultats similaires au modèle volumique mais plus simple à utiliser.



*Modèle volumique*



*Modèle multi-brochette  
équivalent*

Le modèle simplifié est similaire à un modèle brochette classique tout en permettant :

- La prise en compte des effets dus aux modes locaux (ovalisation, torsion etc. ...)
- La prise en compte des singularités géométriques telle que l'influence des traversées.



# Plan de présentation

## Introduction / Contexte / Problématique

### I. Modélisation d'un cylindre creux

- a) Critère de comparaison
- b) Solutions envisagées
- c) Solution retenue et critères de choix

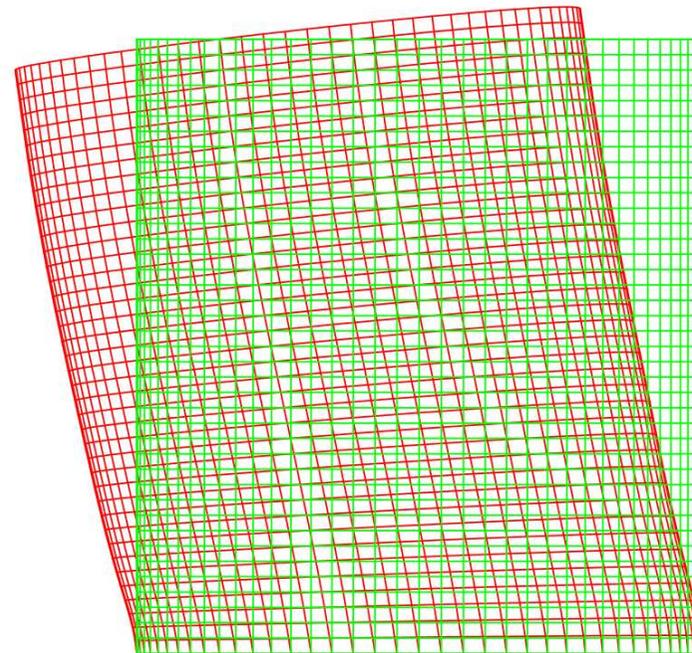
### III. Modélisation de l'enceinte interne

- a) Présentation de l'enceinte P'4
- b) Découpage de l'enceinte
  - c) Radier, Dôme
  - d) Parties courantes
  - e) Traversées
  - f) ISS

### IV. Analyse des résultats

### V. Perspectives

- Objectif: Reproduire fidèlement le comportement mécanique d'un cylindre creux sous chargement sismique en time history.
  
- Critères de comparaison:
  - **Analyse modale** :
    - Fréquence propre
    - Déformée modale
  
  - **Comportement dynamique**

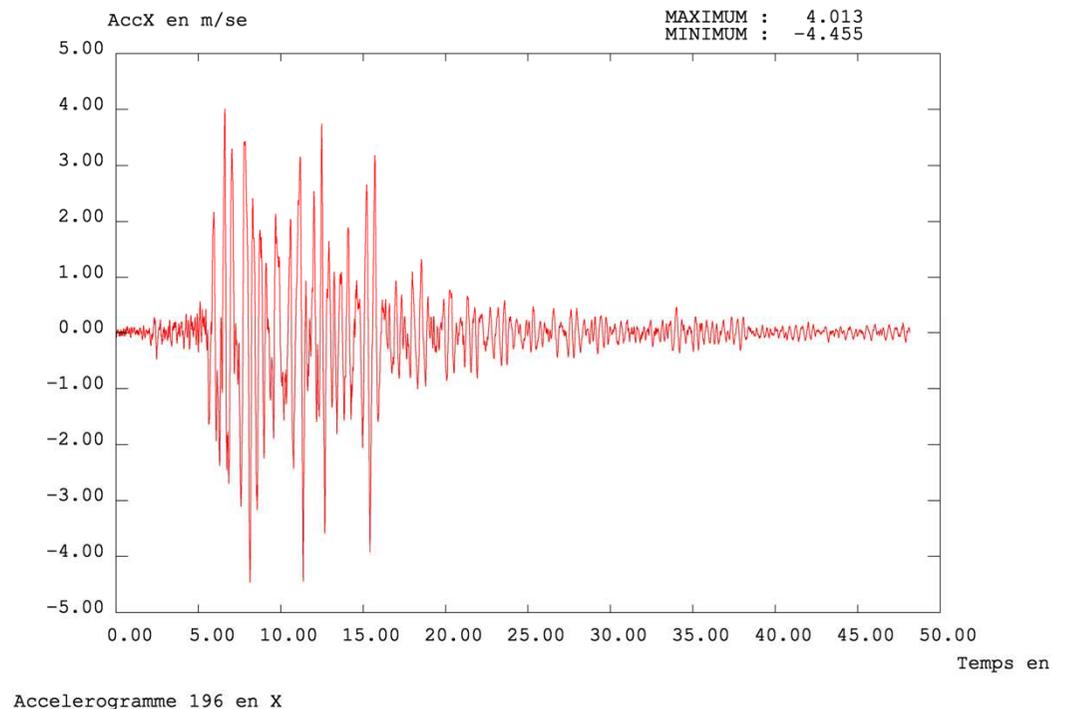


- Objectif: Reproduire fidèlement les déplacements d'un maillage de cylindre creux soumis à une sollicitation sismique.

- Critère de comparaison:

- **Analyse modale**

- **Comportement dynamique :**  
Déplacements à différents points de la structure



b) Comment représenter les liaisons cinématiques entre les brochettes?

*Solution 1 – imposer des conditions de déplacements*

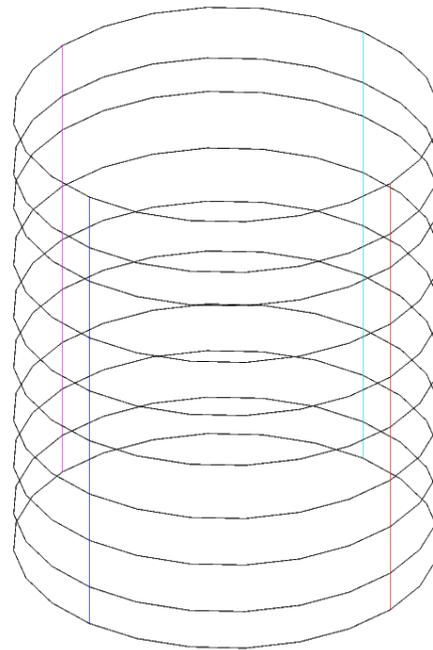
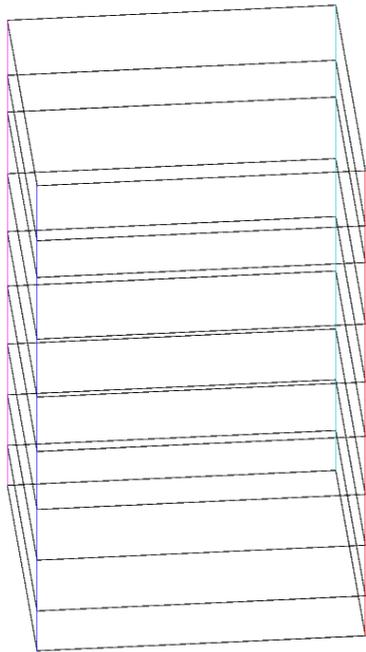
**Supposer un périmètre du cylindre constant (hypothèse petite déformation) permet de lier deux à deux les déplacements des brochettes par rapport à l'axe neutre.**

## Défauts

Nécessite de connaître à tout moment la position de l'axe neutre  
Entraîne des divergences et des incohérences

b) Comment représenter les liaisons cinématiques entre les brochettes?

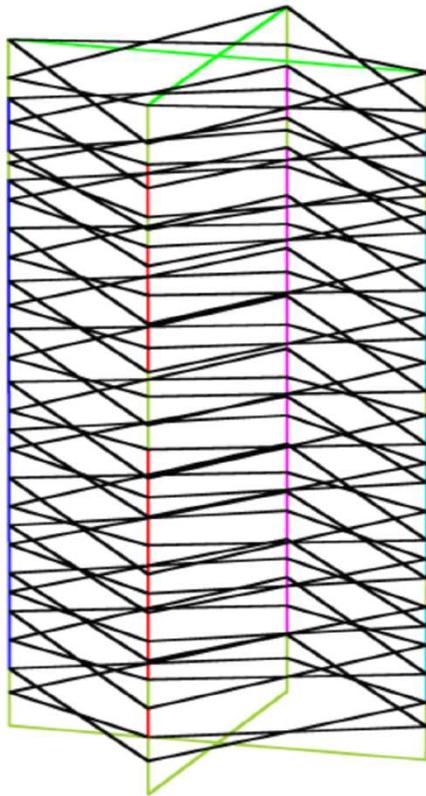
*Solution 2 – utiliser des éléments parallèles horizontaux dont les paramètres sont calés par rapport au modèle volumique*



## Défauts

Impossible de reproduire avec précision le 1<sup>er</sup> mode et par conséquent, les déplacements du modèle volumique.

c) Solution retenue: *Utilisation d'élément de type «croix de St André »*

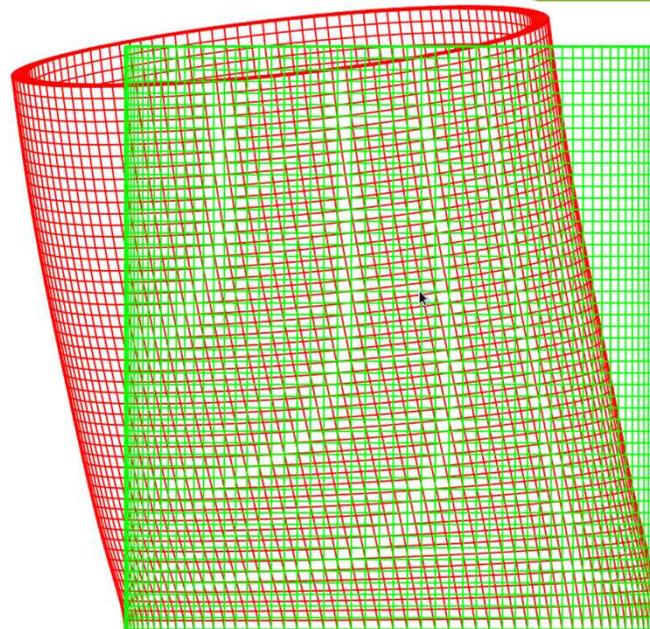


- Les 'diaphragmes' sont créés en partant d'un point d'une brochette, en rejoignant le point supérieur de la broche voisine, puis l'inférieur jusqu'à revenir au point initial.
- Pour la symétrie, chaque diaphragme a son opposé afin de former des croisillons

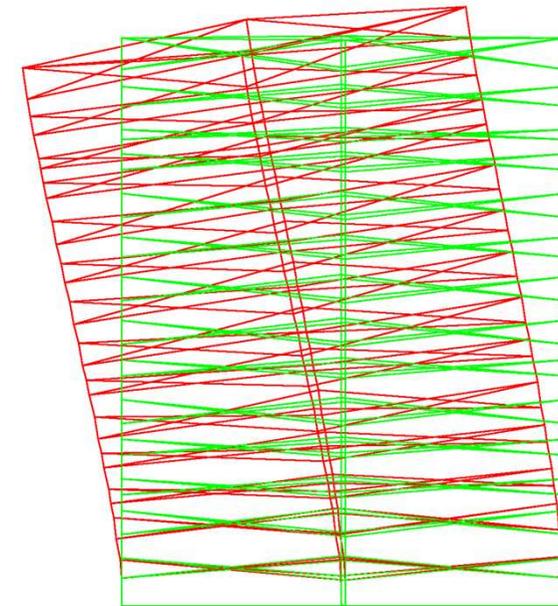
c) Solution retenue: *Utilisation d'élément de type «croix de St André »*

- Les principaux modes sont reproduits

**1<sup>er</sup> mode:  
Basculement simple  
(modes doubles)**



F= 6,46 Hz M=40,4%



F= 6,46 Hz M=45,3%

c) Solution retenue: *Utilisation d'élément de type «croix de St André »*

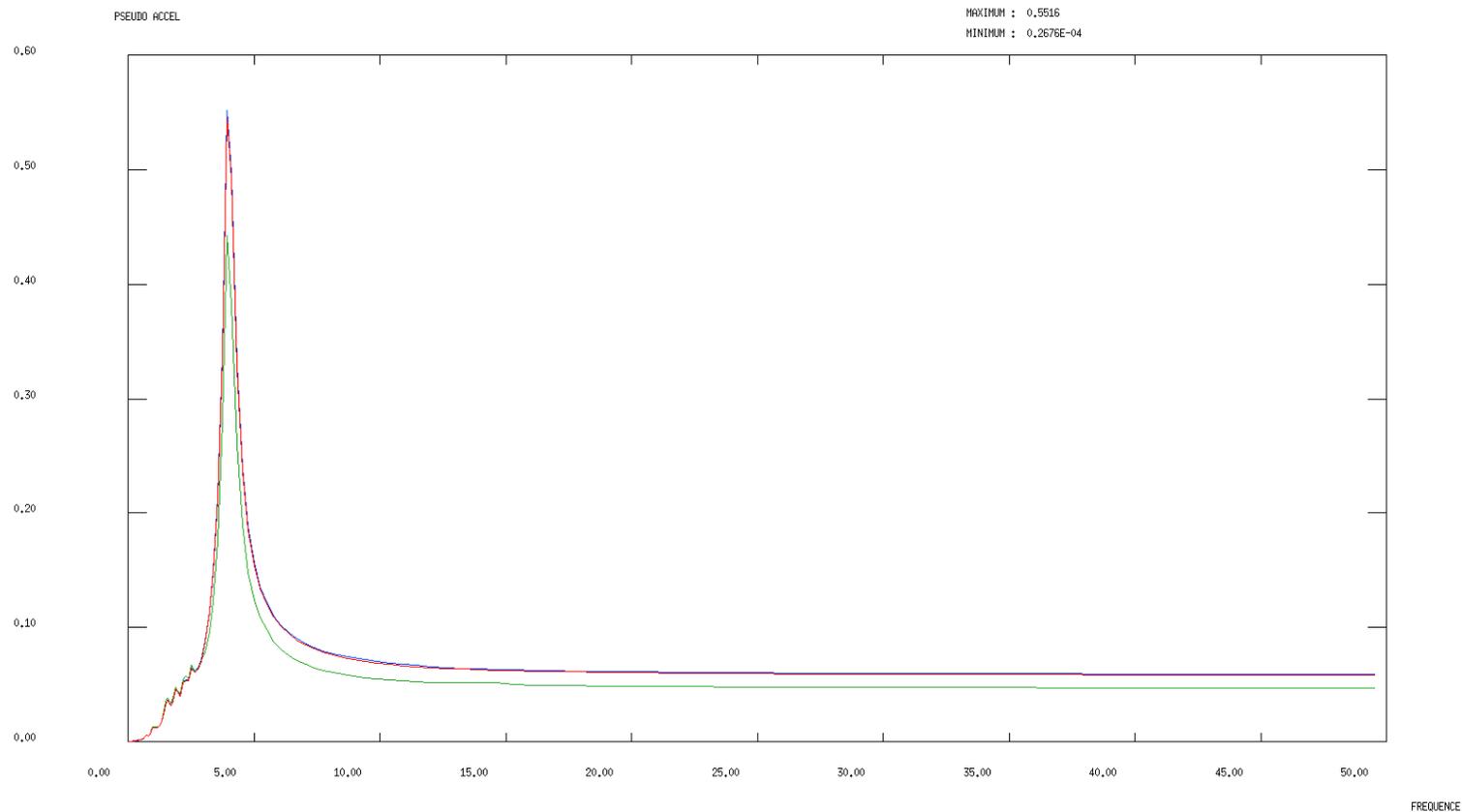
➤ Les principaux modes sont reproduits

Modes	Volumique		4 Brochettes	
	F (Hz)	M (%)	F(Hz)	M(%)
1 <sup>er</sup> mode: Renversement	6,46	40,4	6,46	45,3
2 <sup>ème</sup> mode: (torsion)	11,8	38%	12,3	32%
3 <sup>ème</sup> mode: (Ovalisation)	11,1	22%	12,7	25%
4 <sup>ème</sup> mode: (Pompage)	16,9	51%	17,1	55%
5 <sup>ème</sup> mode: Renversement 2 <sup>nd</sup> ordre	16,7	45%	17,9	47%

## c) Solution retenue: *Utilisation d'élément de type «croix de St André »*

- Les principaux modes sont reproduits
- Les déplacements sont relevés en différents points correspondant géométriquement dans les deux modèles.
- Par soucis de lisibilité, la comparaison est faite à partir de la courbe de la réponse spectrale, qui donne la pseudo-accélération par rapport à la fréquence.

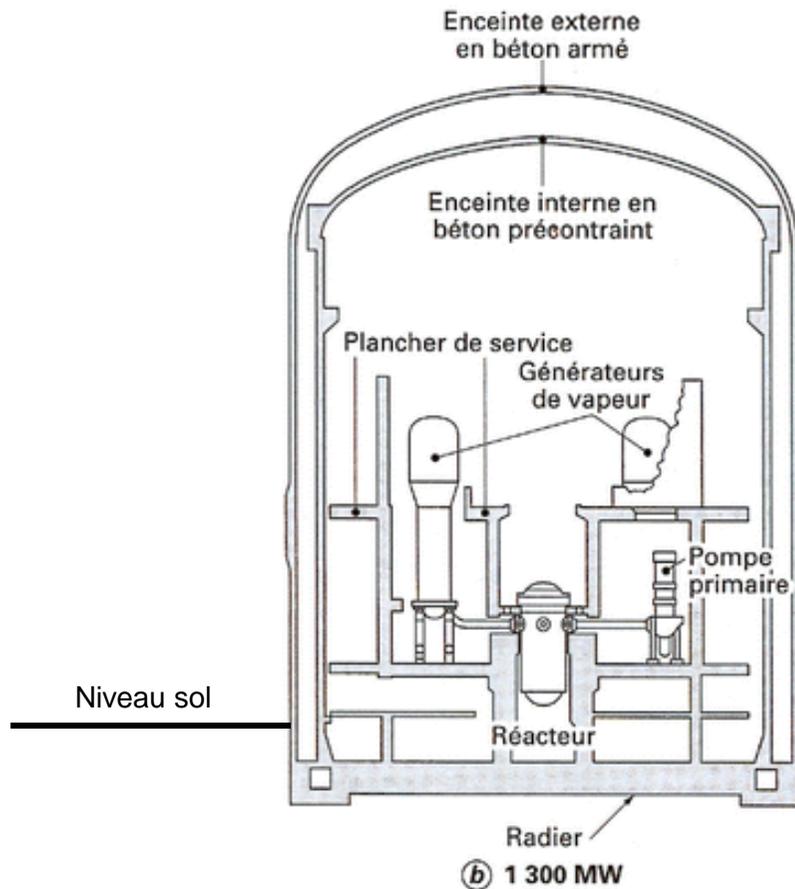
c) Solution retenue: *Utilisation d'élément de type «croix de St André »*



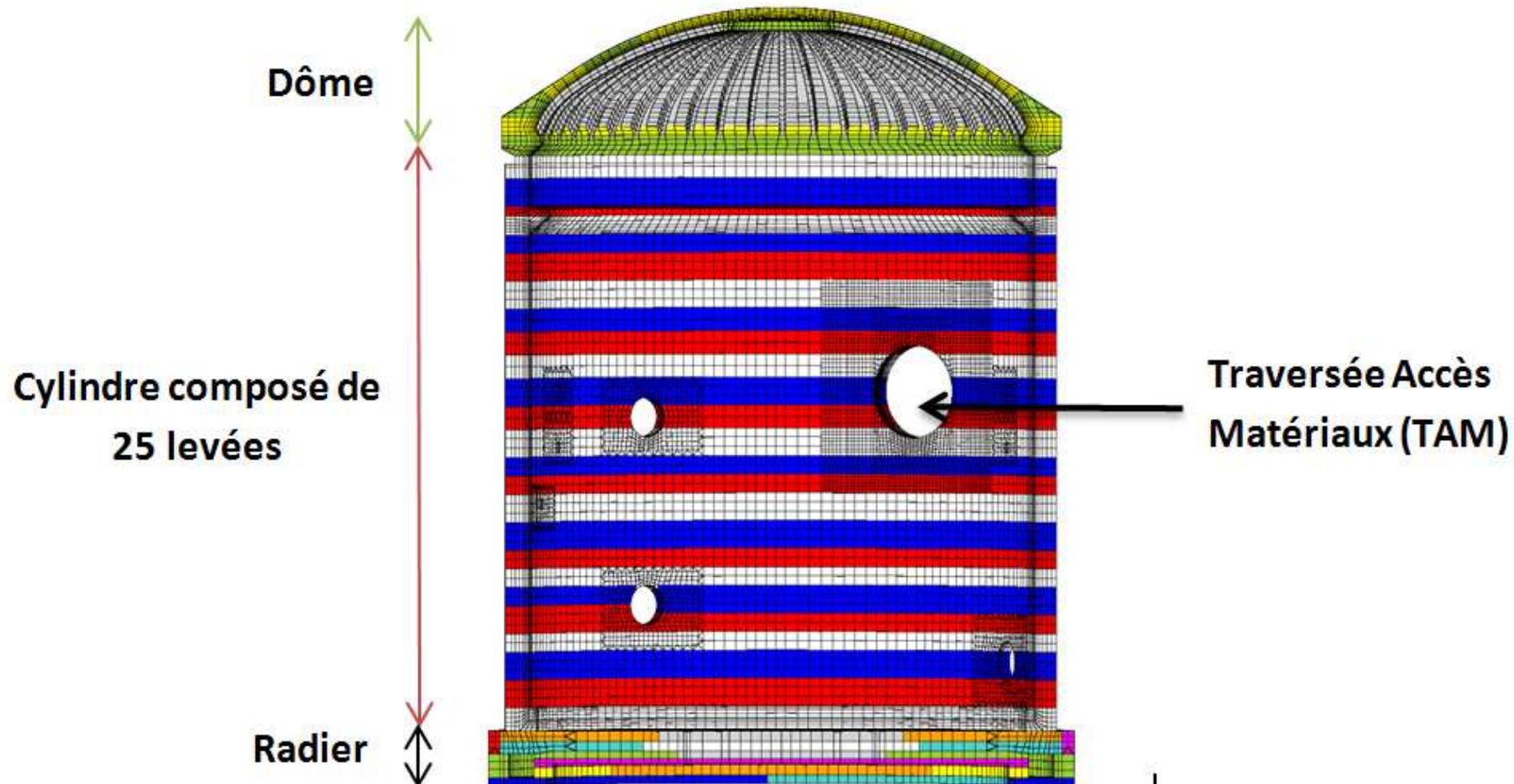
## Conclusion de l'étude préliminaire

L'étude préliminaire basé sur la comparaison des modes et des déplacements a montré que le modèle utilisant des croix de St-André était le plus prometteur. C'est donc la solution retenu pour la modélisation du système complet.

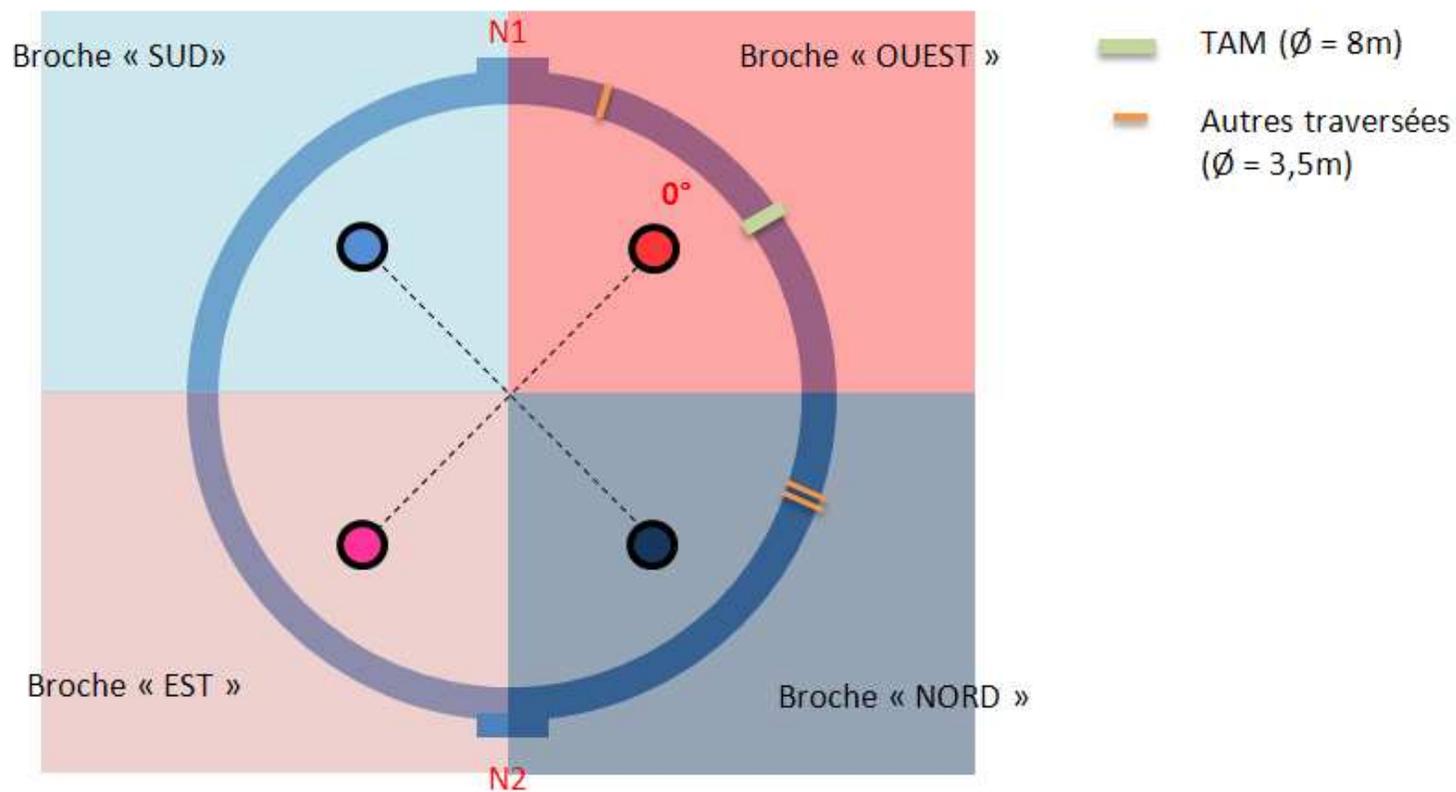
### a) Présentation de l'enceinte P'4



Hauteur	58,1m en haut du dôme et 7m sous le sol.
Diamètre	46,2m
Epaisseur moyenne des parois	1.2m pour l'enceinte interne, 0.55m pour l'enceinte externe
Masse	~48000 t



## b) Découpage de l'enceinte



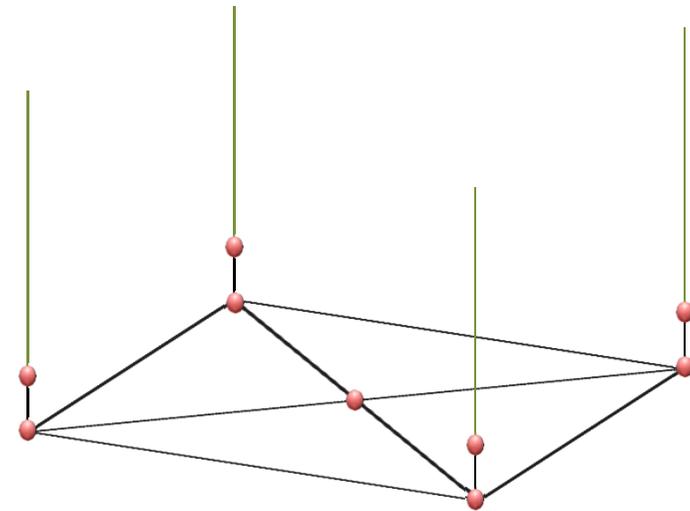
## c) Radier et dôme

- Zones complexes à modéliser.

### Radier

Une partie verticale à la base de chaque broche possède les caractéristiques d'un quart de radier.

La masse de l'ensemble est répartie entre le centre du radier, les points initiaux et les second points de chaque brochette.



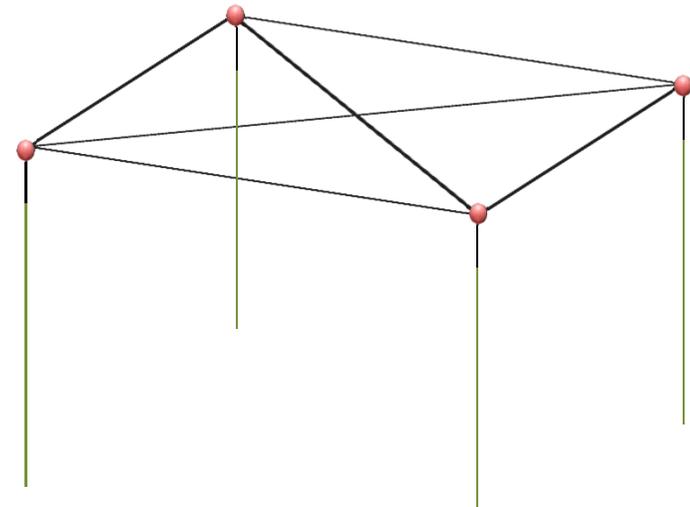
## c) Radier et dôme

- Zones complexes à modéliser.

### Dôme

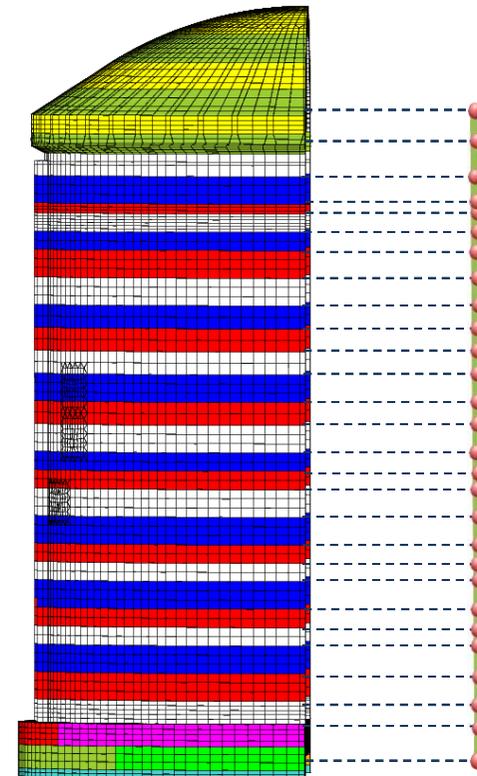
Le début du dôme (plot A, B et C) est modélisé en le considérant dans l'axe des brochettes.

Le reste de la masse est appliqué sur les derniers points de chaque brochette, à la hauteur du centre de gravité du dôme

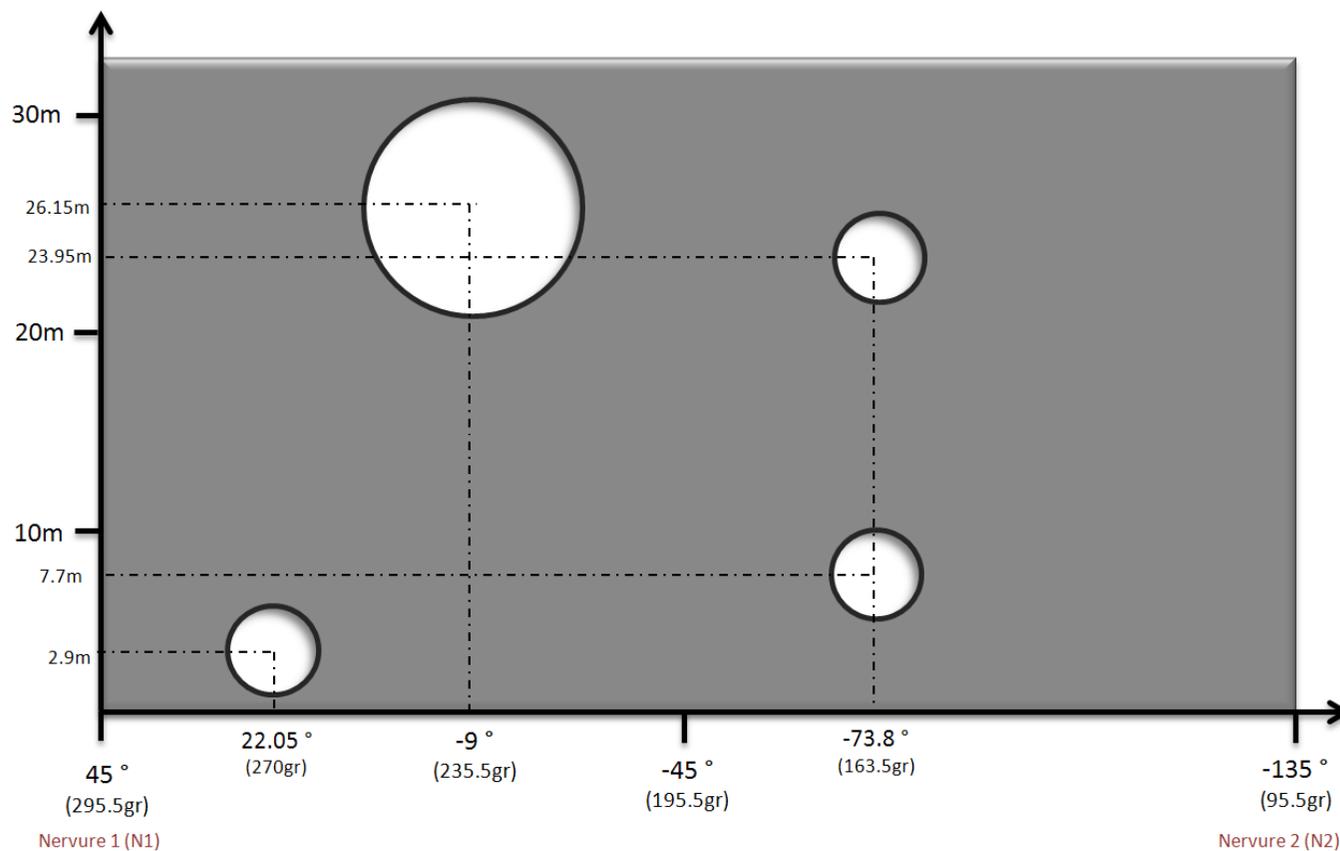


## d) Parties Courantes :

- Les points de masse discrétisés des brochettes sont situés à l'intersection des levées.
- On calcule 3 paramètres :
  - Les sections de chaque levée (constant sauf pour la 1<sup>ère</sup> levée, le pont roulant et le dôme)
  - Les valeurs des masses discrétisés (égal, pour chaque point, à la moitié des masses des quarts de levées voisines)
  - Les inerties de chaque levées, calculées au point milieu de l'épaisseur et dans l'axe de symétrie du quart de levée.



## e) Traversées



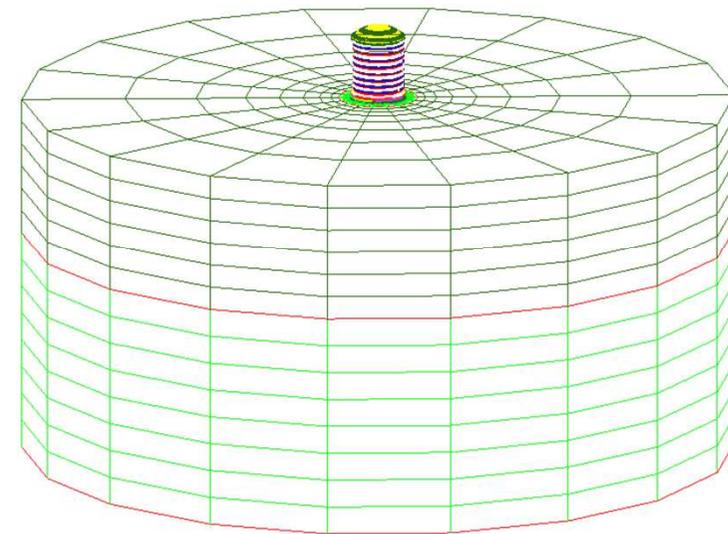
*Élévation développée de la face « Nord et Ouest »*

## f) Interaction sol-structure (ISS)

Ne pas considérer l'influence du sol entraîne une surestimation ou une sous-estimation du risque sismique.

### Paramètres du sol (site de Cattenom)

Module d'Young E	1,9 GPa
Coefficient de Poisson $\nu$	0,3
Masse volumique $\rho$	2000 kg/m <sup>3</sup>

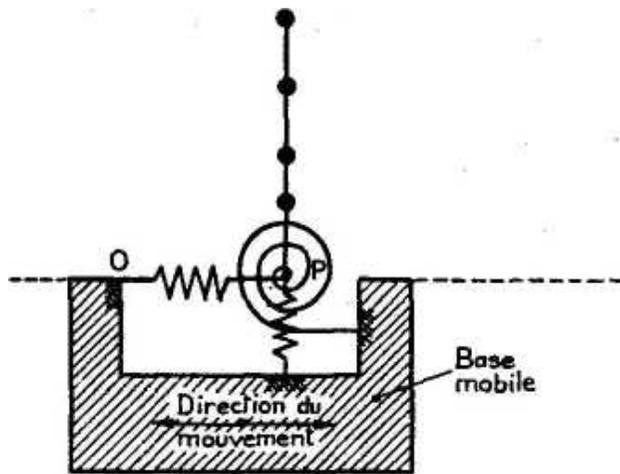


*Modélisation complète du sol*

GIBI FECIT

## f) Interaction sol-structure (ISS)

Ne pas considérer l'influence du sol entraîne une surestimation ou une sous-estimation du risque sismique.



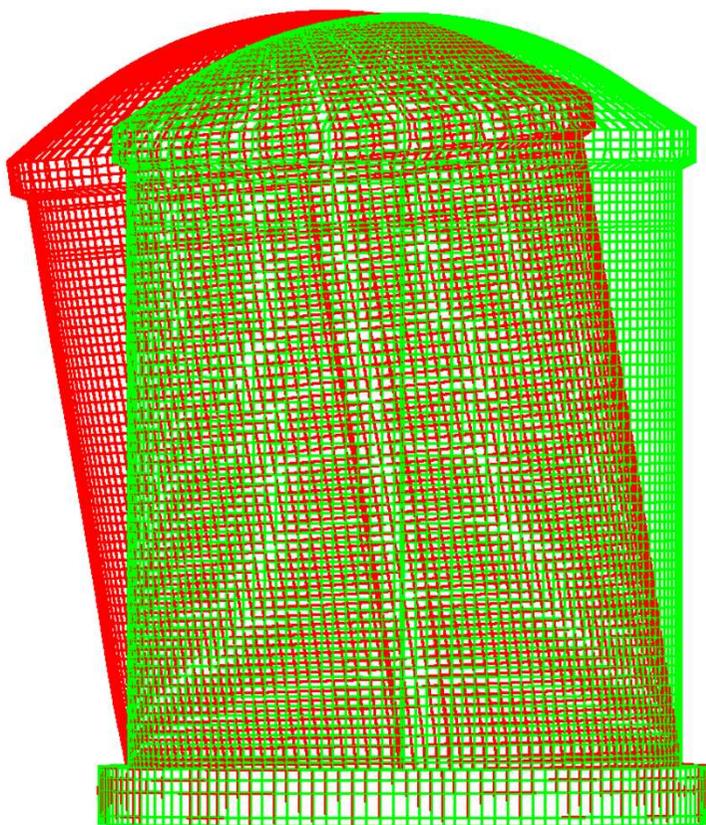
*Modélisation par des ressorts*

Raideur de Newmark	
Horizontal	$\left( \frac{\quad}{\quad} \right)$
Vertical	$\frac{(\quad)}{(\quad)(\quad)}$
Rotation	$\frac{\quad}{\quad}$

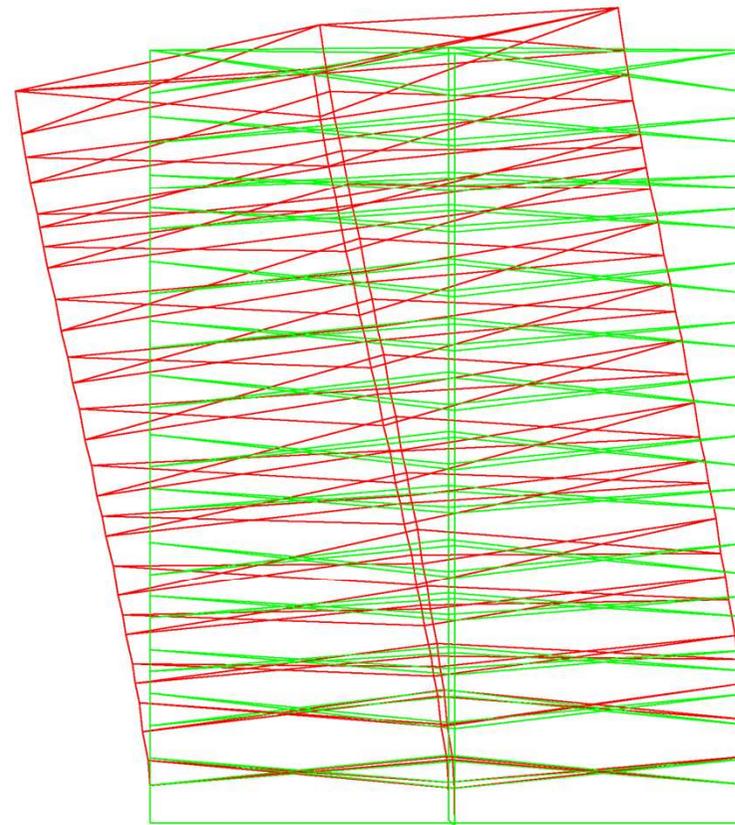
## Phases

- 1) Etude de l'enceinte sans les traversées (modèle axisymétrique) avec base bloqué
- 2) Etude de l'enceinte complète avec base bloqué
- 3) Introduction de l'ISS

### 1<sup>er</sup> mode



1 FREQUENCE 3.9964



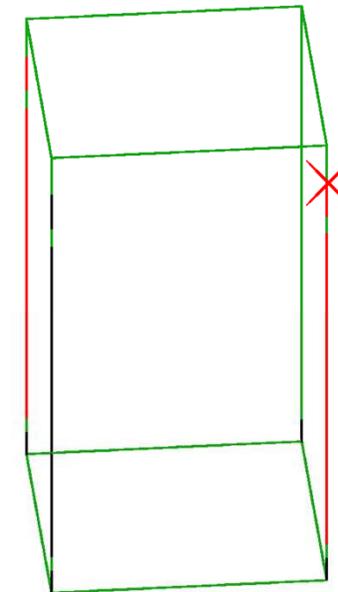
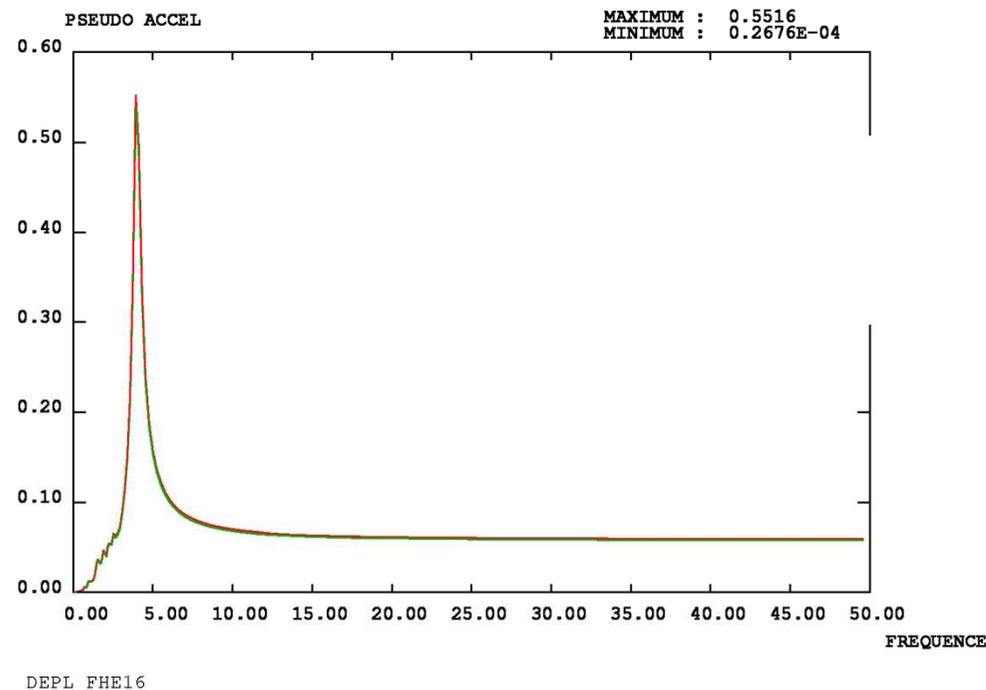
FREQUENCE 3.9958

Modes	Volumique		4 brochettes	
	F (Hz)	M (%)	F (Hz)	M(%)
1 <sup>er</sup> mode: Renversement	3,996	61,6	3,996	68,5
2 <sup>ème</sup> mode: Pompage	11,03	23,1	11,32	27,5
3 <sup>ème</sup> mode: Renversement 2 <sup>ème</sup> ordre	12,85	66,6	13,19	72,8

## Déplacements à différents points de la structure

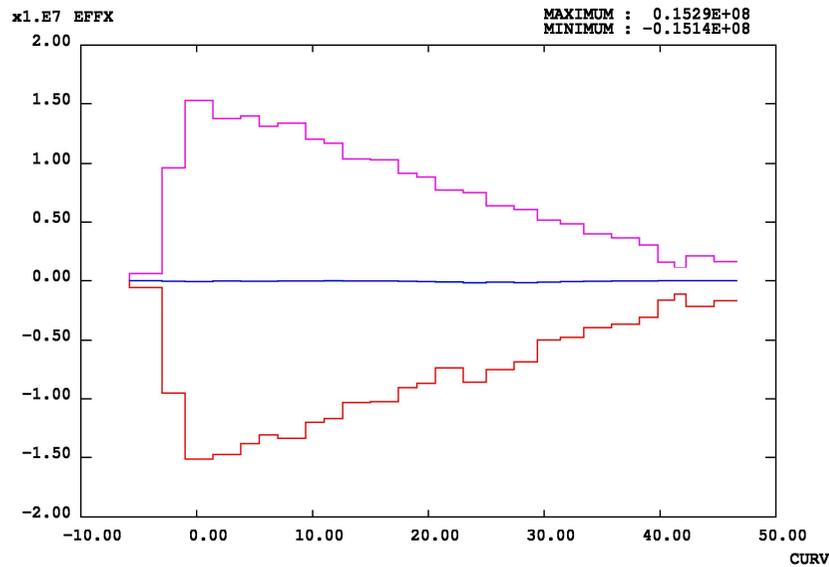
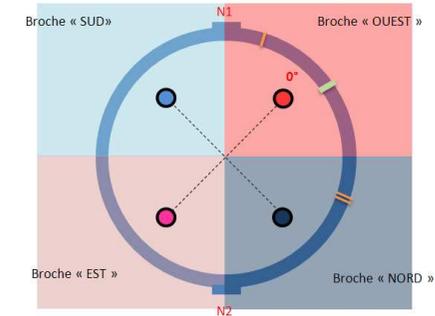
- Sans traversées, base bloquée:

Rouge: Spectre modèle volumique  
Vert: Spectre modèle 4 brochettes

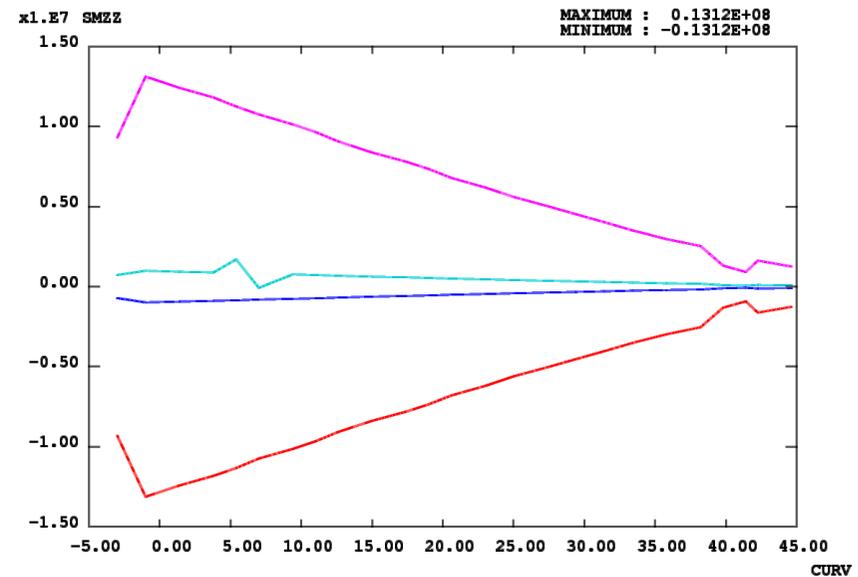


## Contrainte axiale en fonction de la hauteur

- Modèle sans traversées, base bloquée:



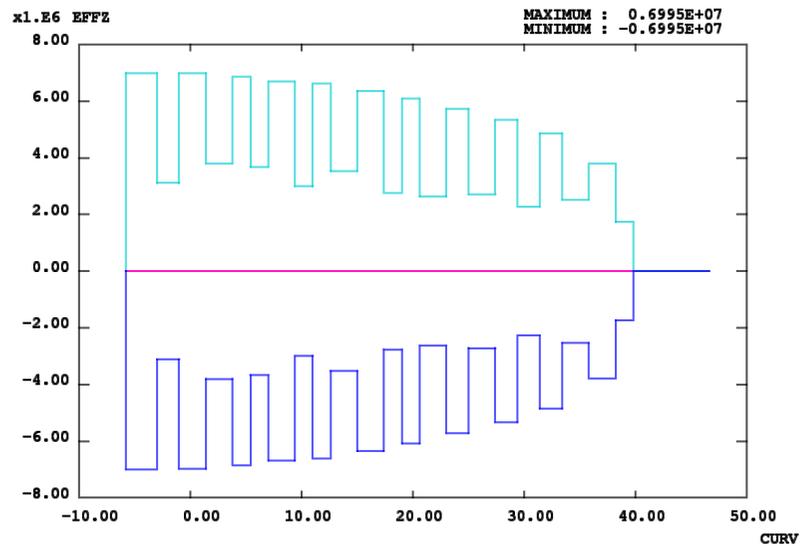
4 Brochettes



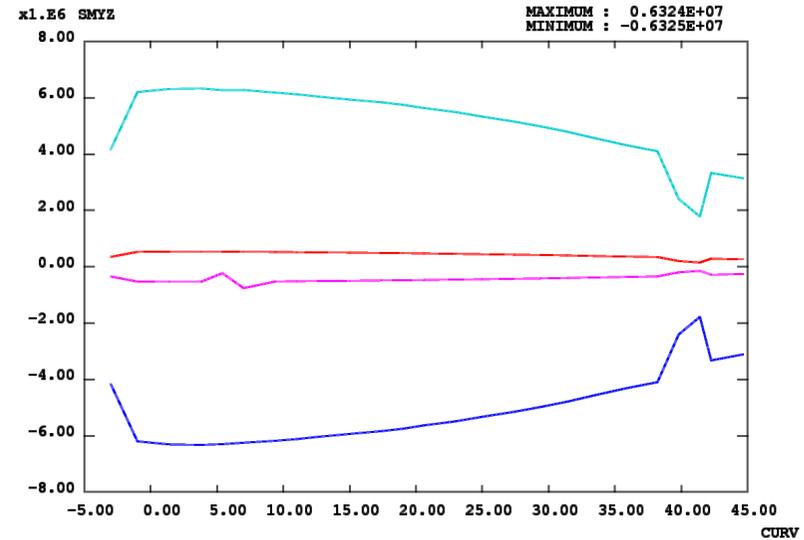
Modèle volumique

## Contrainte tangentielle en fonction de la hauteur

- Modèle sans traversées, base bloquée:



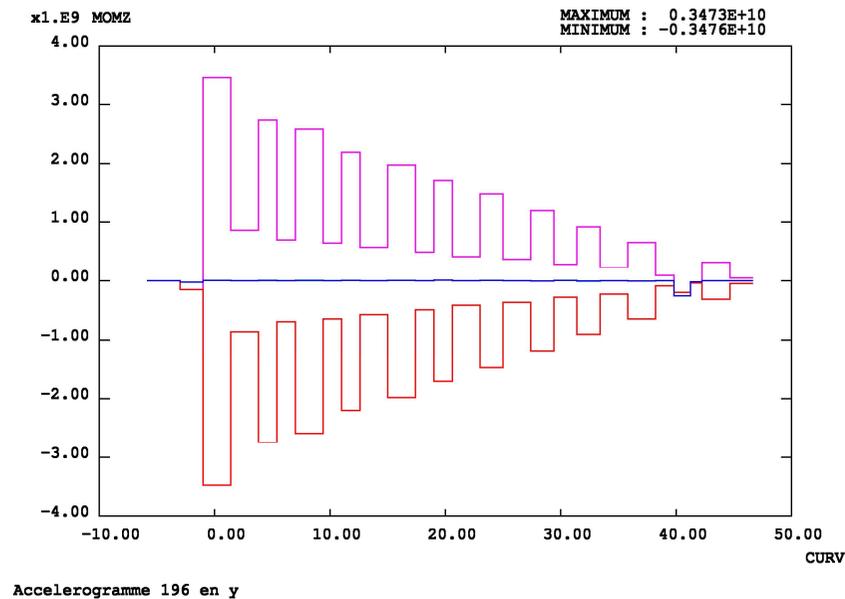
4 Brochettes



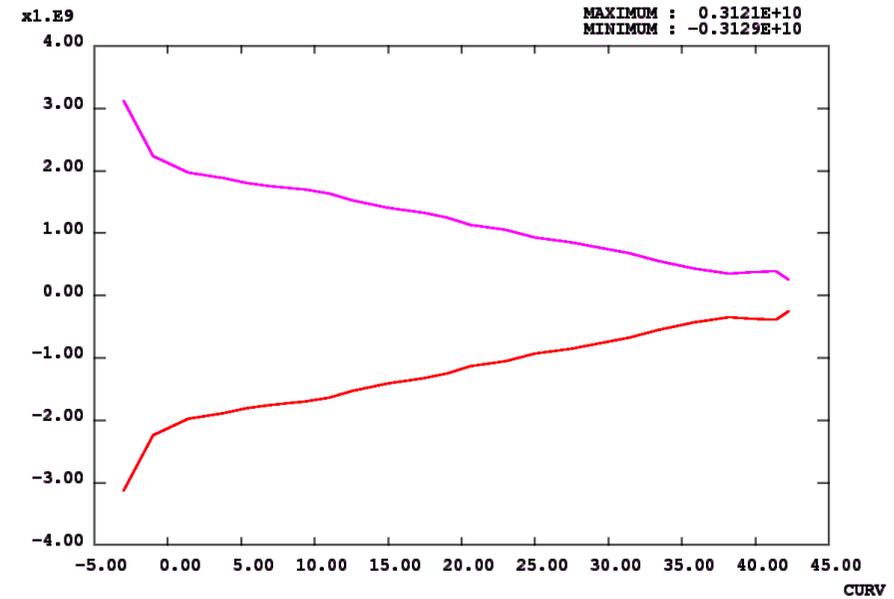
Modèle volumique

## Moment fléchissant suivant OT en fonction de la hauteur

- Modèle sans traversées, base bloquée :



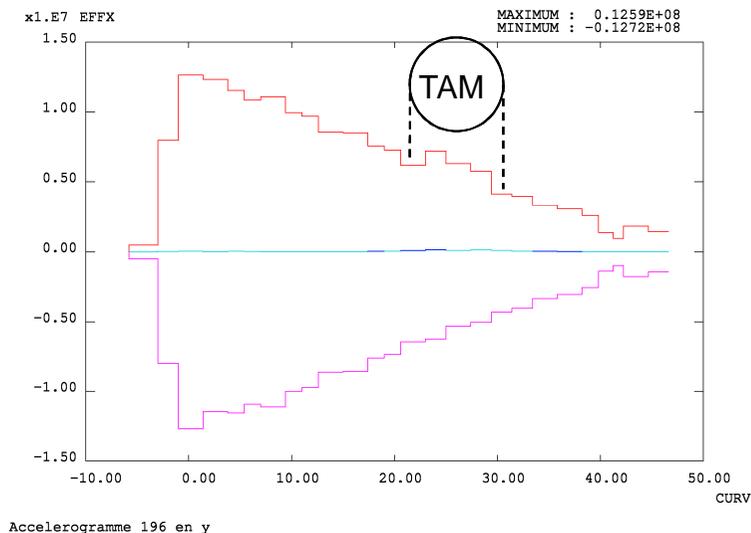
4 Brochettes



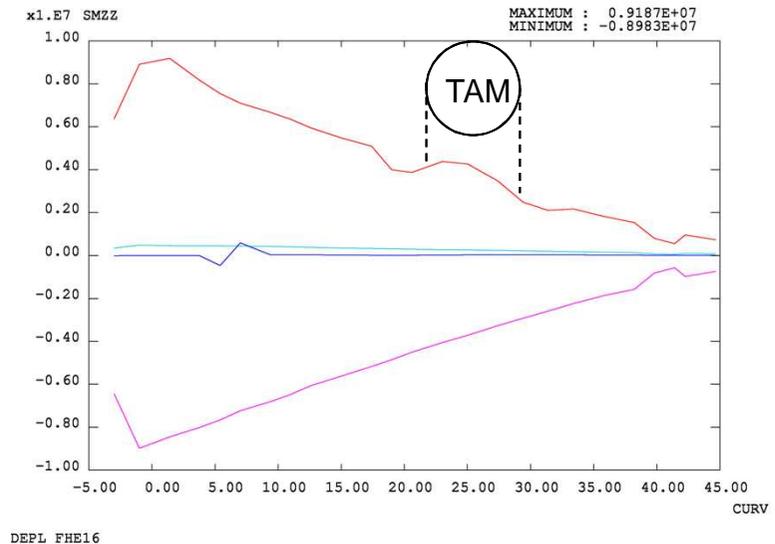
Modèle volumique

## Contrainte axiale en fonction de la hauteur

- Modèle P'4, base bloquée:



4 Brochettes

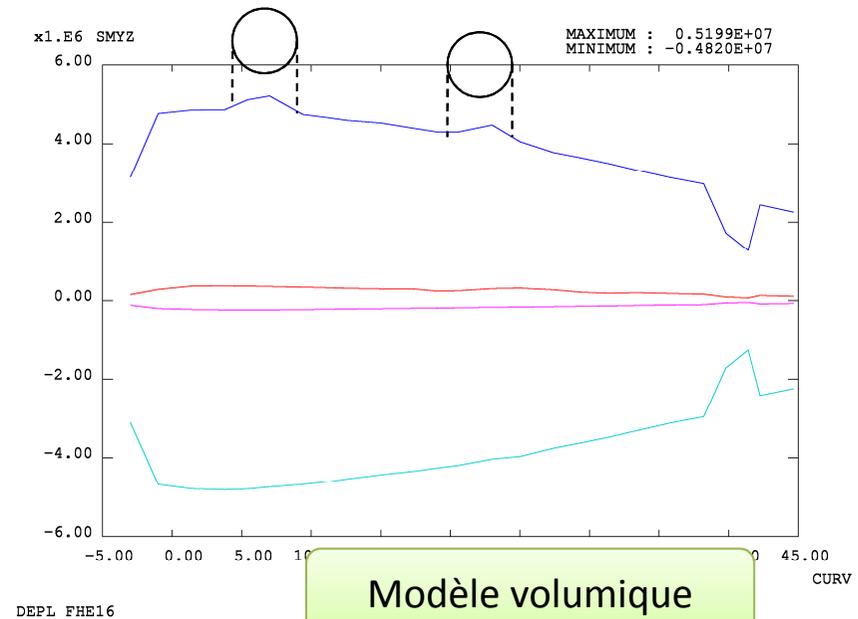
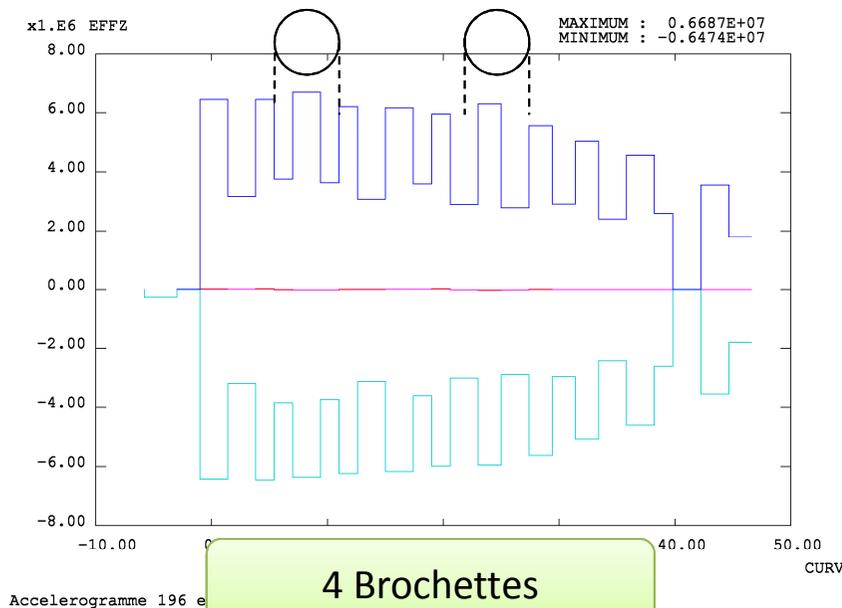


Modèle volumique

## Contrainte tangentielle en fonction de la hauteur

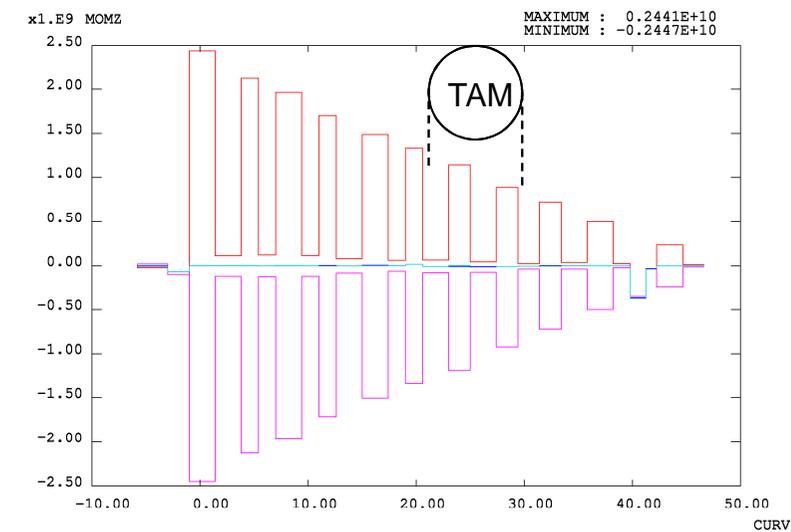
- Modèle P'4, base bloquée:

Les cercles correspondent aux deux traversées à  $-73,8^\circ$



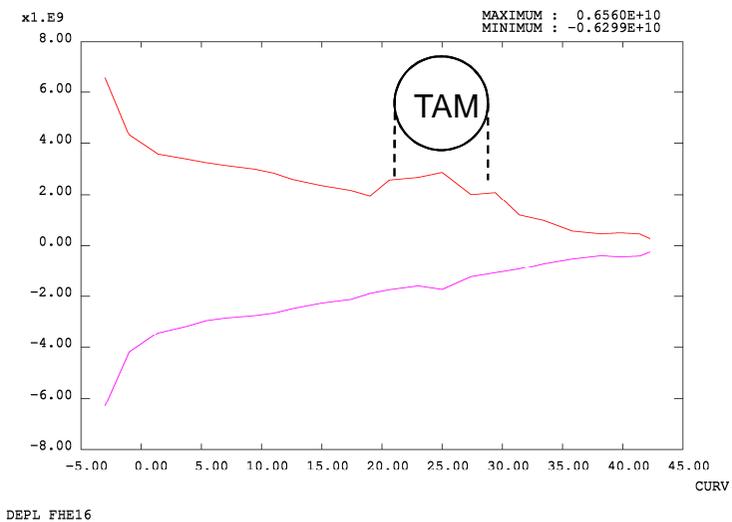
## Moment fléchissant suivant OT en fonction de la hauteur

- Modèle P'4, base bloquée:



Accelerogramme 196 en y

4 Brochettes

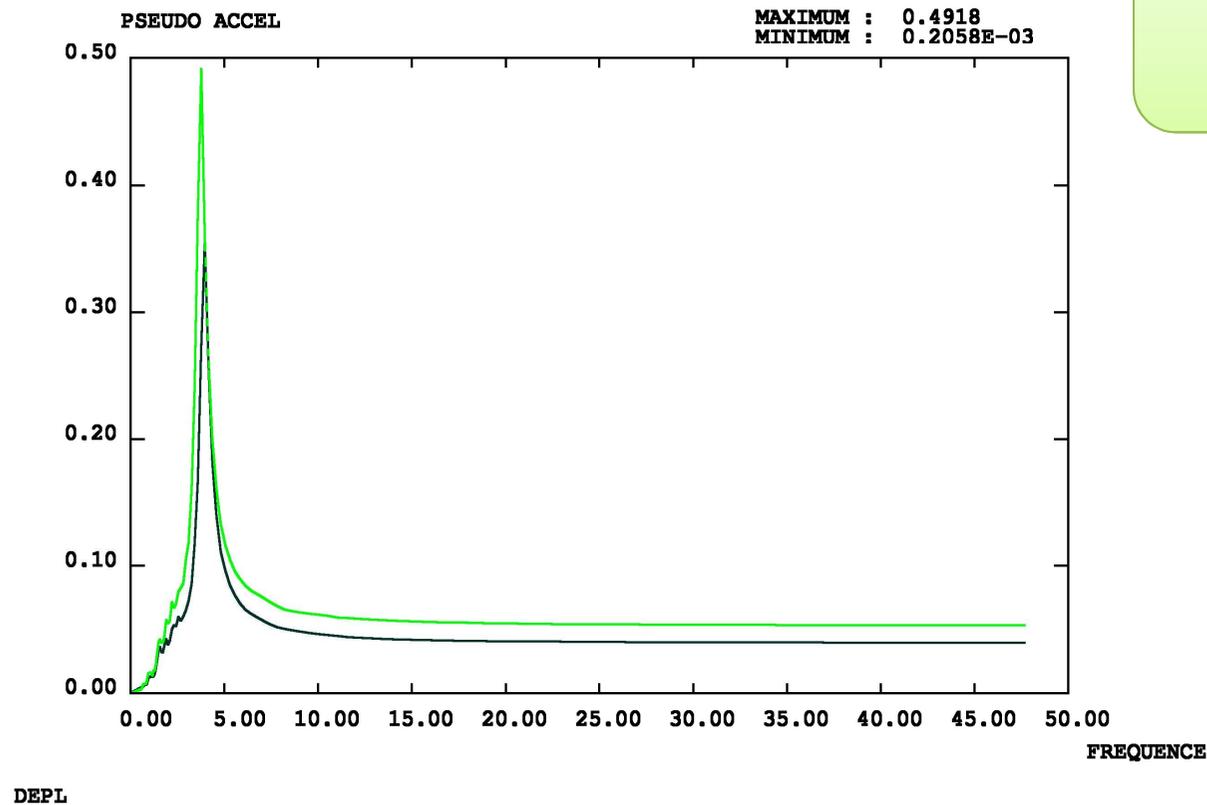


Modèle volumique

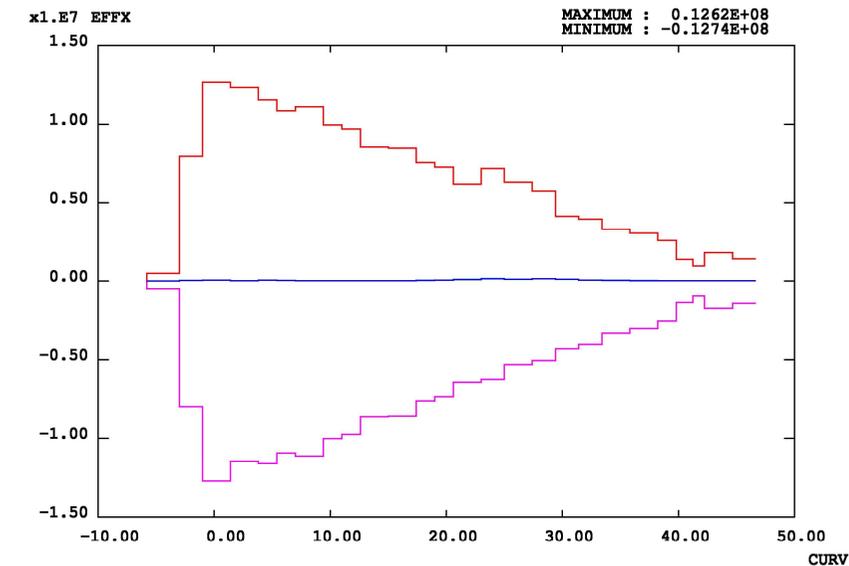
## Déplacements

- Avec traversées, ISS:

Bleu: Sans ISS  
Vert: Avec ISS

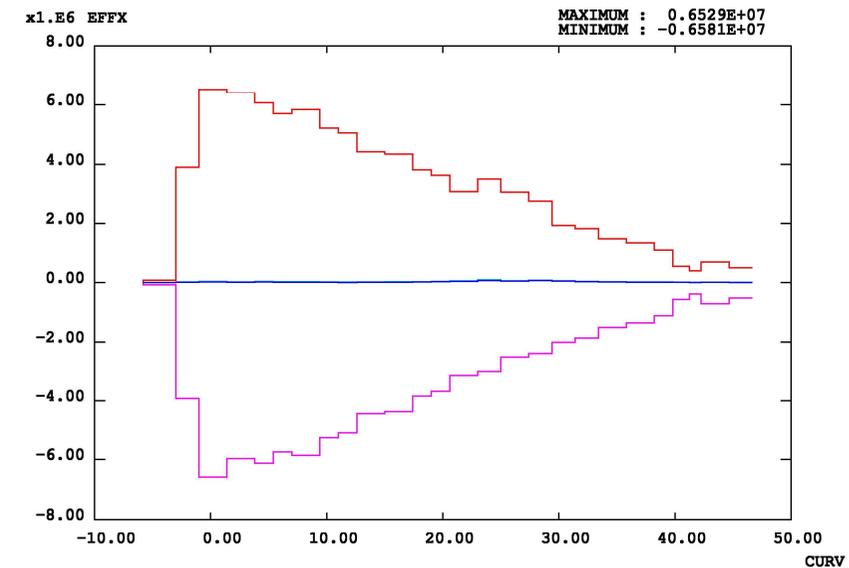


- Effet de l'ISS



Accelerogramme 196 en y

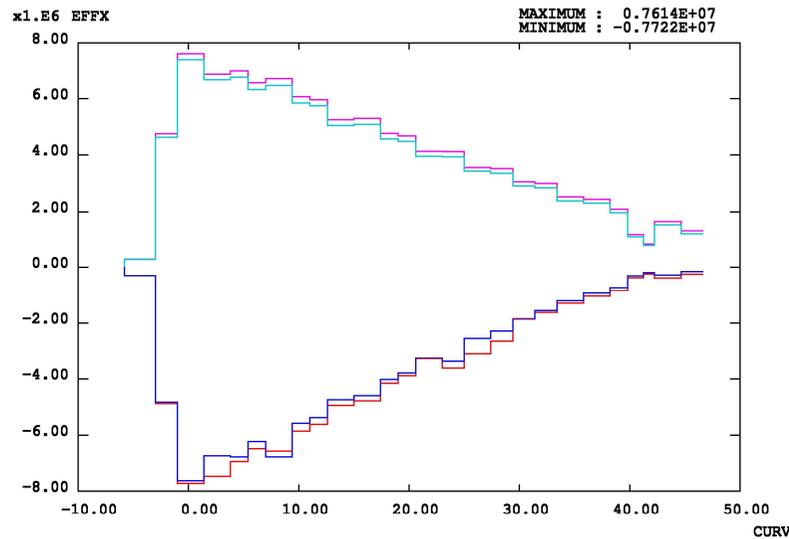
Appui bloqué



Accelerogramme 196 en y

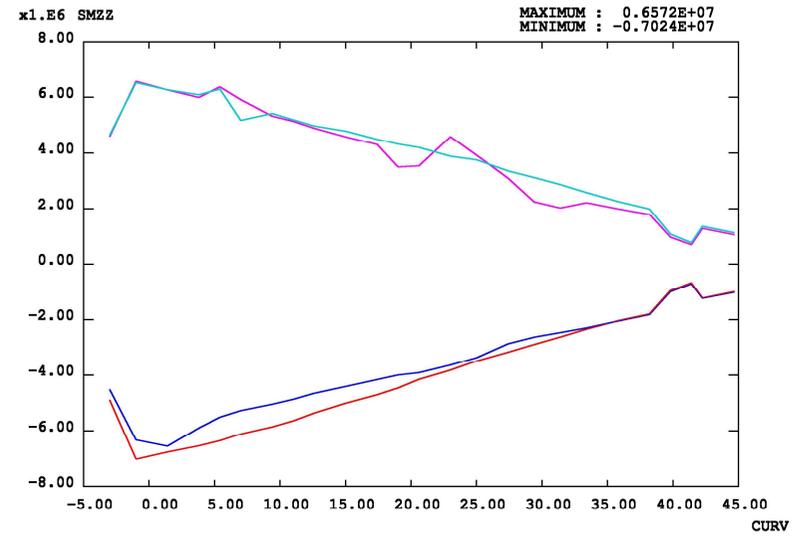
Appui sur ressort

- Séisme dans les 3 directions



Accelerogramme AQA en Y

4 Brochettes



BI FECIT

Modèle volumique



## Conclusion

L'étude de faisabilité a montré que le modèle à 4 brochettes permettait de:

- Reproduire les principaux modes de la structure.
- Reproduire le comportement dynamique global de l'enceinte.
- Donner des valeurs approchées de différents efforts.

Le principal avantage par rapport au modèle volumique est le gain conséquent en temps de calcul:

- Modèle 4 brochettes : ~ 20 sec en analyse dynamique linéaire.
- Modèle volumique : ~10 heure de calcul en analyse dynamique linéaire, ~ 100 Go de données.



## Perspectives

- Ajouter dans la modélisation l'effet de l'enceinte externe et des structures internes.
- Tenir compte de l'amortissement de la structure.
- Améliorer la modélisation de l'interaction sol-structure.
- Introduire des lois de comportement non-linéaire.



## Perspectives

**Merci pour votre attention**

