



# Modes non linéaires & Diagnostic

Non linéarités à jeux localisées

-

Applications aux tubes de générateurs de vapeur

M. Corus

10 octobre 2016



# SOMMAIRE

1. SYSTÈMES NON LINÉAIRES : ENJEUX SÛRETÉ ET DISPONIBILITÉ
2. CALCUL DES MODES NON LINÉAIRES : MÉTHODE EH-MAN
3. ILLUSTRATION AVEC LES TUBES DE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR
4. CONCLUSION

# ENJEUX

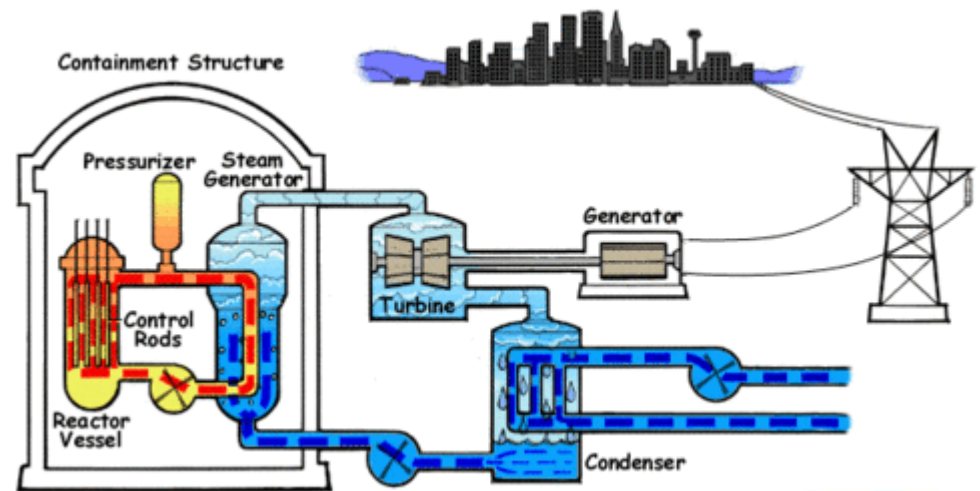
## ■ Enjeu de sûreté

- Intégrité des matériels
- Confinement de la radioactivité

## ■ Disponibilité

## ■ Matériels concernés :

- Motopompe primaire
  - Stabilité des paliers
- Turbine :
  - Contacts rotor / stator
  - Détection de fissuration du rotor
- Générateurs de vapeur :
  - stabilité des tubes



# CALCUL DES MODES NON LINÉAIRES

## MÉTHODE EH – MAN

1/3

- Thèse EL Hadi MOUSSI implanté dans *Code\_Aster*® (EDF R&D)

- « Analyses de structures vibrantes dotées de non-linéarités localisées à jeu à l'aide des modes non-linéaires »

$$M\ddot{U}(t) + KU(t) = F_{NL}(t)$$

- $F_{NL}$  est l'effort généré par le contact

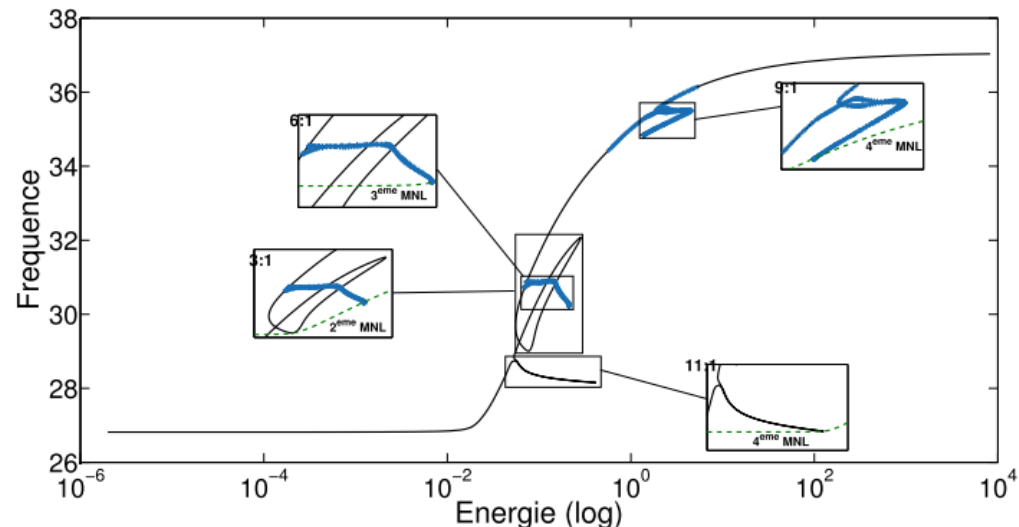
- Contenu spectral important
- Zones d'impacts petites devant la taille de la structure

- Association de deux techniques

- Equilibrage harmonique (EH)
- Méthode asymptotique numérique (MAN)

- Difficultés principales

- Détection des bifurcations
- Analyse de stabilité des solutions

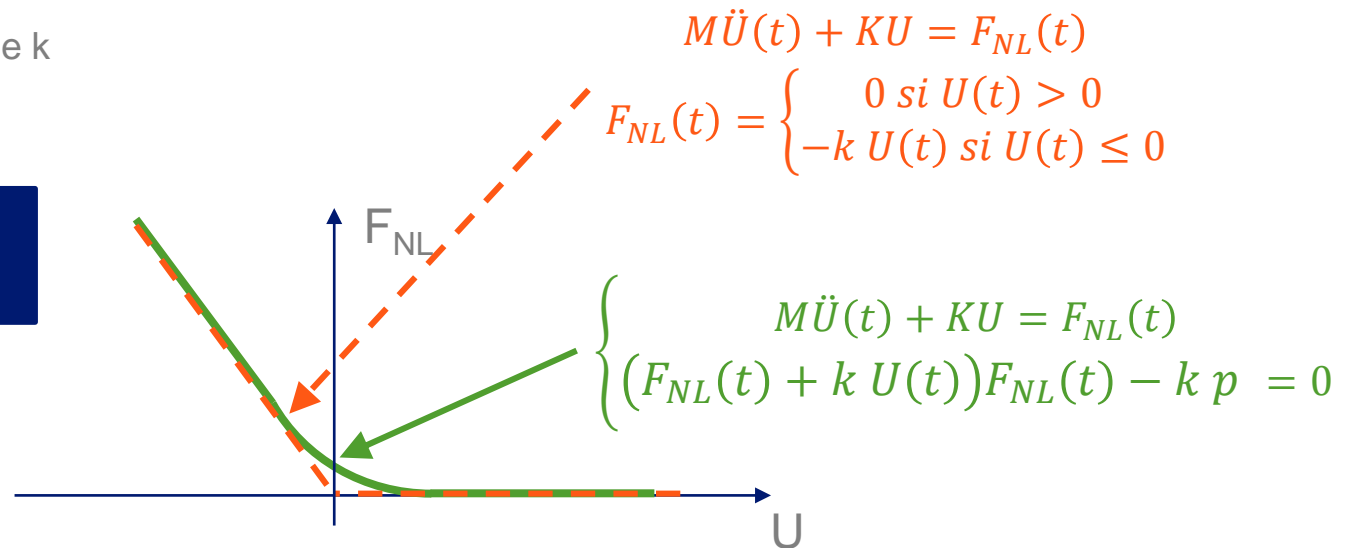
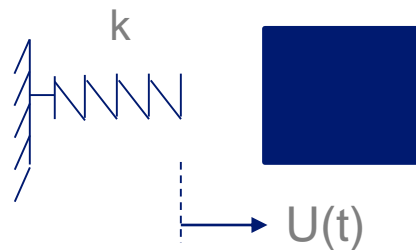


# CALCUL DES MODES NON LINÉAIRES

## MÉTHODE EH – MAN

2/3

- **Pré requis : mise sous forme quadratique de l'effort non linéaire**
  - $F_{NL}(t)$  défini comme les solutions d'une fonctionnelle  $G(U(t), F_{NL}(t), \mathbf{Z}(t), p) = 0$
  - $G$  est au plus quadratique en chaque paramètre
    - introduction de  $\mathbf{Z}(t)$  : paramètres « auxiliaires »
- **Exemple : butée élastique unilatérale**
  - Jeu nul
  - Raideur de butée  $k$



# CALCUL DES MODES NON LINÉAIRES

## MÉTHODE EH – MAN

3/3

### ■ Equilibrage harmonique

- Décomposer la réponse ( $U(t)$ ,  $V(t)$ ) et les efforts NL ( $F_{NL}(t)$ ,  $Z(t)$ ) sur une base harmonique :
  - $U(t) \approx \sum_{k=0}^{Nu} U_{c_k} \cos(k\omega t) + U_{s_k} \cos(k\omega t)$
  - $F_{NL}(t) \approx \sum_{k=0}^{Nf} F_{c_k} \cos(k\omega t) + F_{s_k} \cos(k\omega t)$  &  $Z(t) \approx \sum_{k=0}^{Nf} Z_{c_k} \cos(k\omega t) + Z_{s_k} \cos(k\omega t)$

**$Nu \ll Nf$  : le contenu fréquentiel du choc est significativement plus important que celui de la réponse**

- Ecriture du problème algébrique  $\rightarrow R(S)=0$  /  $S=[U_{c_k}, U_{s_k}, V_{c_k}, V_{s_k}, F_{c_k}, F_{s_k}, Z_{c_k}, Z_{s_k}, \omega]$

### ■ Recherche des solutions par méthode de continuation

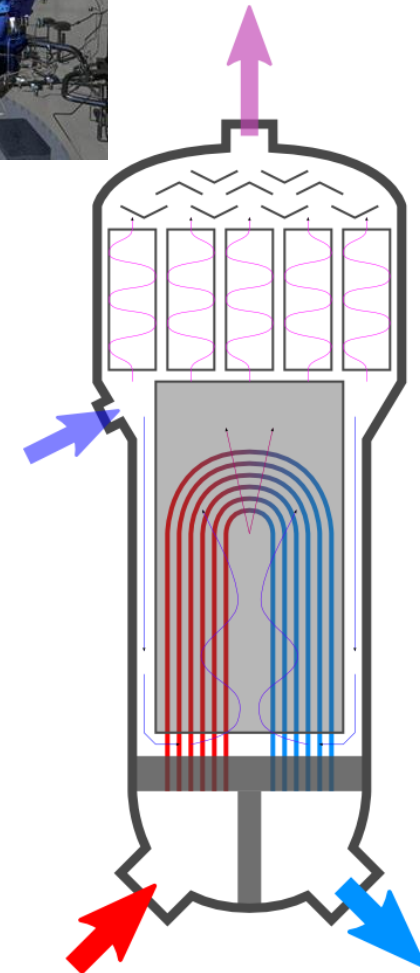
- On initialise  $S$  avec le mode linéaire souhaité  $\rightarrow S(0)=S_0$
- On développe  $S$  en série entière tronquée à l'ordre  $N$  avec un paramètre de chemin  $a$ 
  - $S(a)=S_0+a.S_1+a^2.S_2+\dots+a^N.S_N$
- La résolution donne une partie du chemin sur le domaine de validité du développement en série.



# PRÉSENTATION DU GV

- **Echangeur de chaleur primaire ↔ secondaire**
  - Tubes en U inversés
    - Circuit primaire : écoulement intérieur aux tubes
    - Circuit secondaire : écoulement extérieur aux tubes
- **Confinement de la radioactivité**
  - Garantir l'intégrité des tubes
- **Sollicitations**
  - Partie basse :
    - Ecoulements transverses monophasiques
  - Partie haute
    - Ecoulements transverses diphasiques (eau / vapeur)

➔ **Risque de fuites après usure vibratoire des tubes**



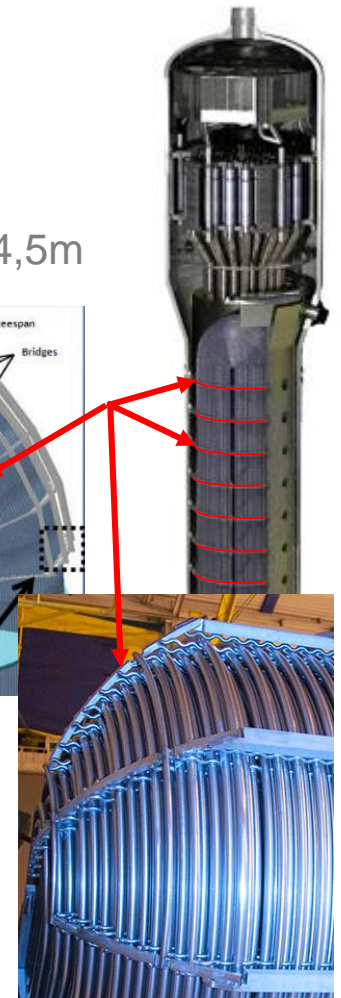
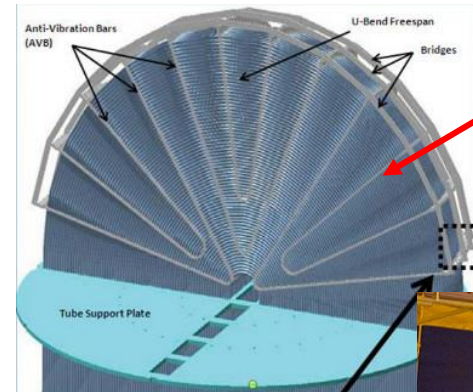
# PRÉVENIR LA DÉFAILLANCE

## ■ Système souple

- Plus de 3000 tubes /  $\varnothing$  ~20 mm / 10m de haut /  $0,5\text{m} < \text{rayon cintree} < 4,5\text{m}$
- encastrement à la base
- 7 à 9 supports simples répartis sur la partie droite

## ■ Parades

- Maîtrise des écoulements
- Coefficients de sécurité
- Campagnes d'essais et retour d'expérience
- Systèmes de supportages en partie haute



## ET POURTANT...

## ■ San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS)

- 31 janvier 2012 : détection d'une fuite du primaire vers le secondaire dans le GV3
- Arrêt de la tranche et inspection des générateurs de vapeur

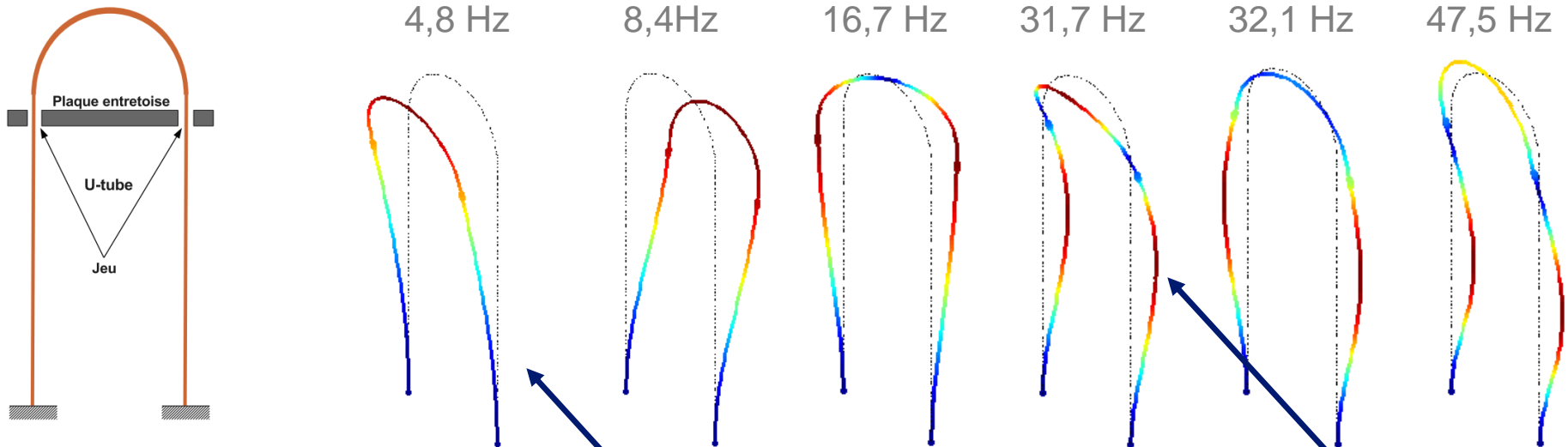
→ **Détection d'usure par frottement entre tubes d'un même plan**



# POURQUOI PAS UN MNL?

1/4

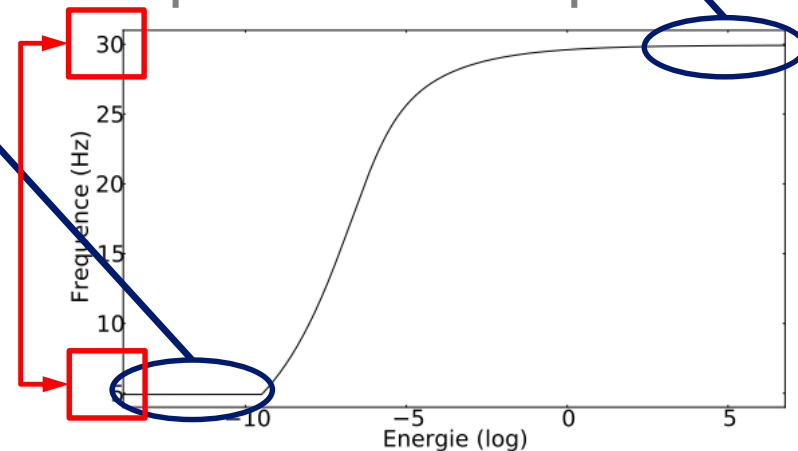
- Construction d'un modèle E.F. simplifié d'un tube de GV du parc 900MW



- Recherche des modes non-linéaires à partir du premier mode hors plan

- Détermination de la plage de variation

- Faible nombre d'harmonique
- Résultat peu précis mais rapide
- Absence de bifurcation



# POURQUOI PAS UN MNL?

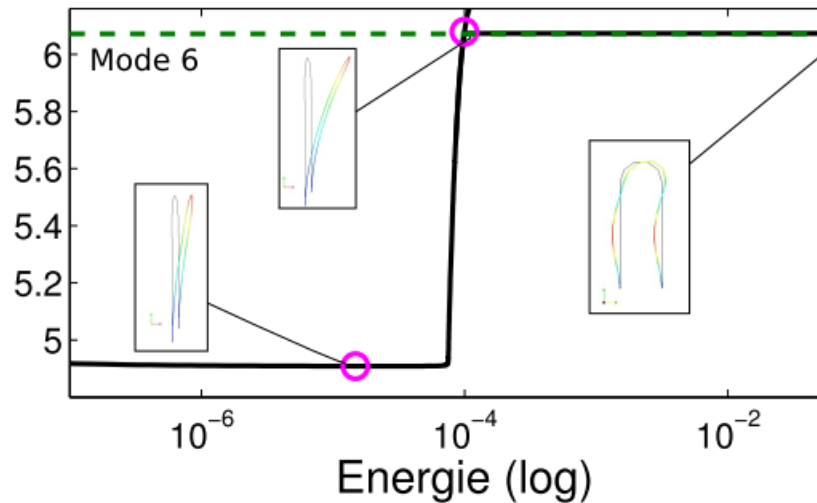
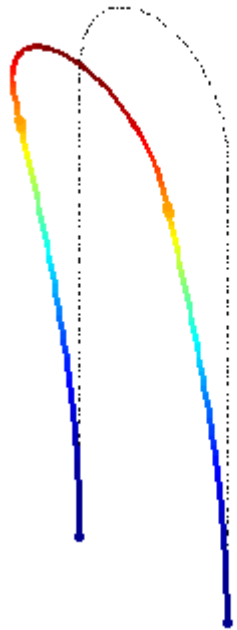
2/4

- Raffinement de l'étude

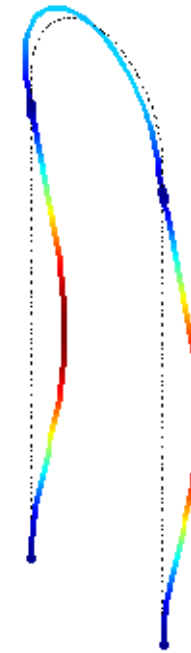
- Réduction de la bande de fréquence de l'analyse
- Augmentation du nombre d'harmonique

→ Détection d'une résonance interne dans le plan!

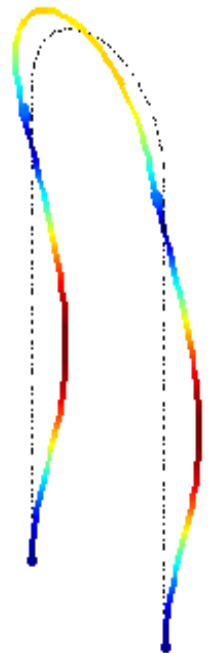
Mode 1 – 4,8 Hz



Mode NL 8:1



Mode 6 – 47,5 Hz



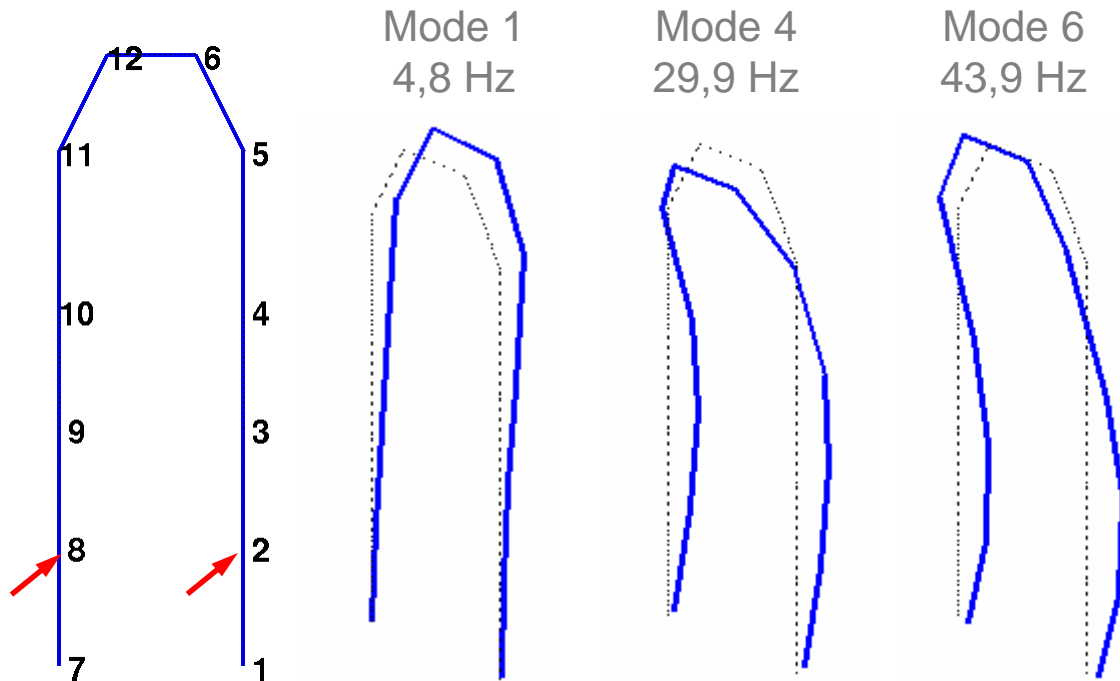
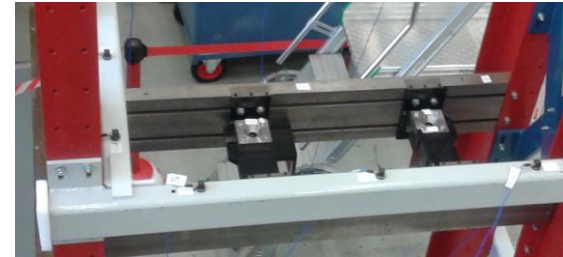
# POURQUOI PAS UN MNL?

3/4

## MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE

### ■ Configuration :

- 12 capteurs répartis sur le tube
- Analyse modale préalable → modes linéaires
- 2 excitateurs dans la direction hors plan (Y)
- Balayage sinus à plusieurs niveaux d'amplitude



# POURQUOI PAS UN MNL?

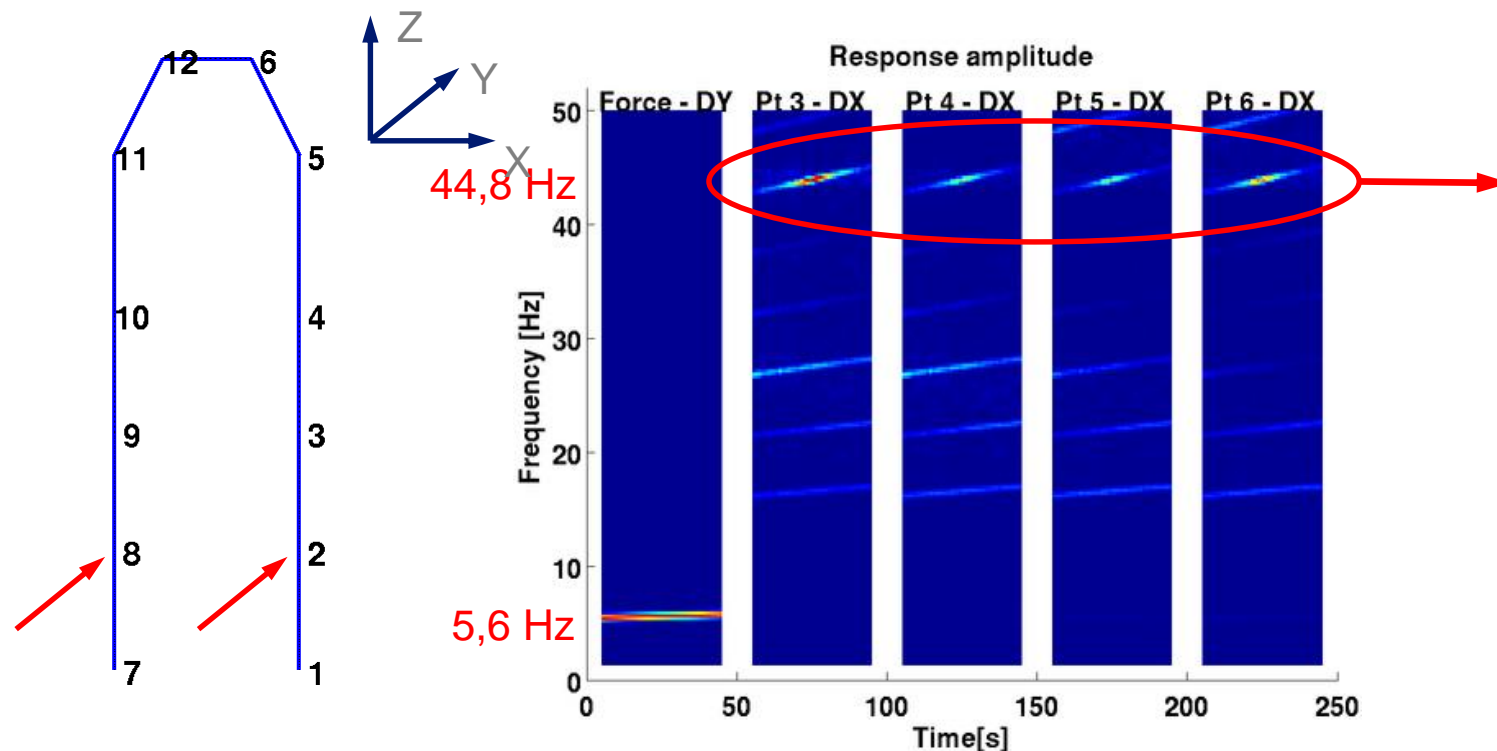
4/4

## MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE

- **FFT glissantes sur le signal temporel**
  - Mouvement plan à 8 fois la fréquence d'excitation
    - Résonance interne 8:1 entre les MNL 1 et 6

- **Cause possible de défaillance du GV de San Onofre**

Résonance  
interne  
8 : 1



# CONCLUSION

- **EH-MAN : Outil de calcul des MNL disponible dans un code industriel**
  - Contacts localisés
  - Butées élastiques
  - Problèmes de « grande taille »
- **Utilisable pour le diagnostic « R&D »**
  - Validation d'une intuition plus que calcul « from scratch »
  - Nécessite une certaine « expertise »
- **Validation expérimentale sur le cas du tube GV**

## ET SAN ONOFRE?

- **Pas de MNL sur la géométrie du GV de SONGS**

**➔ Erreurs de calculs sur les écoulements diphasiques**