

LIVRE BLANC



Aide au diagnostic  
L'expertise dynamique



# Edito



Par Henri CAMPAGNA, pdg de dB Vib Groupe et Michel SENAC, Rhodia Recherche et Technologie

L'utilisation d'agitateurs est très répandue dans les industries chimiques, pharmaceutiques et de nutrition animale. Constitués d'une cuve et d'un arbre à axe vertical équipé de mobiles, ces agitateurs fonctionnent à vitesse variable pour différents produits et différentes hauteurs de remplissage. Le bout d'arbre est libre, il n'y a pas de palier de maintien. L'objectif final de cette étude est de préciser les plages de fonctionnement dans lesquelles il n'y a pas de risque de dommages pour la cuve et ses équipements (vitesses d'agitation/niveaux de remplissage), notamment lors du dénoyage des mobiles en rotation.

## NOTRE GROUPE



Expert du bruit, des vibrations, de la maintenance conditionnelle et du traitement de l'air



Cet article comporte 2 parties. Une première partie dans laquelle on a réalisé :

- la signature vibratoire de la cuve du réacteur, de sa tourelle, de son arbre d'agitation ;
- l'analyse modale de l'arbre à l'arrêt en air et rempli d'eau ;
- l'analyse d'ordre en fonctionnement en eau et en acide sulfurique.

Une deuxième partie dans laquelle on a réalisé :

- une étude par éléments finis afin de recalibrer le modèle ;
- une estimation des déplacements maximaux rencontrés.

### Références et analyse cinématique de la ligne d'arbre

#### ➤ Moteur :

Marque : Felten et Guillaume

Moteur asynchrone

Puissance 30 kW à 1500 tr/min

Vitesse de rotation : entre 0 et 1850 tr/min

Paliers à roulement référence : 6312C3 côté bout d'arbre et côté ventilateur

#### ➤ Réducteur :

Marque : Trasmital Bonfiglioli

Type : V 311 N2 25 V 200 T

Premier étage : planétaire Z10 = 13 dents

Satellites Z11 = 27 dents

Couronne Z12 = 68 dents

Deuxième étage : planétaire Z20 = 22 dents

satellites Z21 = 22 dents

couronne Z22 = 68 dents

#### ➤ Agitateur :

Marque : Mixel

Référence : MN1400XZ-I900

Nombre d'hélices : 2 x diam. 1400

Nombre de turbines en bout d'arbre : 1 x diam. 900

Fréquence critique de l'arbre calculée à vide : 256 tr/min

Plage de fonctionnement à éviter : +/- 30 % soit entre 179 et 333 tr/min

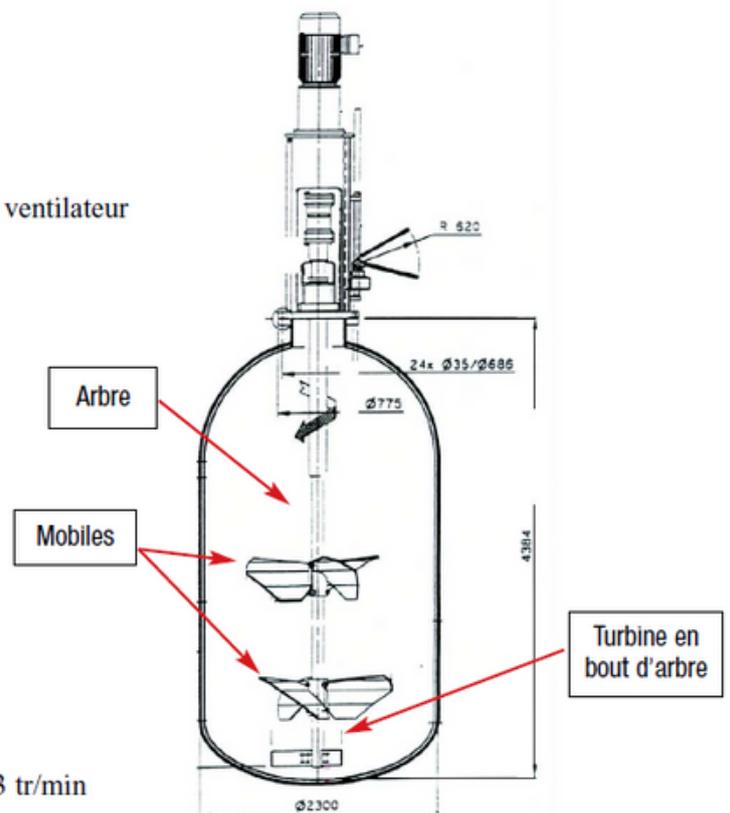


Figure 1 : schéma de l'installation.

## Objectif

Réaliser la signature vibratoire de la cuve du réacteur, de sa tourelle, de son arbre d'agitation et, si possible des internes, afin de déterminer les modes propres de cuve et internes, les déplacements maximaux du mobile selon les vitesses d'agitation et les niveaux de remplissage (comportement au dénoyage des mobiles). L'objectif final étant de préciser les plages de fonctionnement dans lesquelles il n'y a pas de risque de dommages pour la cuve et ses équipements (vitesses d'agitation/niveaux de remplissage).

Les mesures ont été réalisées :

- pour un taux de remplissage du réacteur de 0 à 100 % ;
- pour 2 fluides : eau et acide sulfurique 98 % ;
- pour toute la gamme de vitesses de rotation (moteur à vitesse variable) : de 0 à 70 tr/min de l'arbre d'agitation.

### Instrumentation utilisée

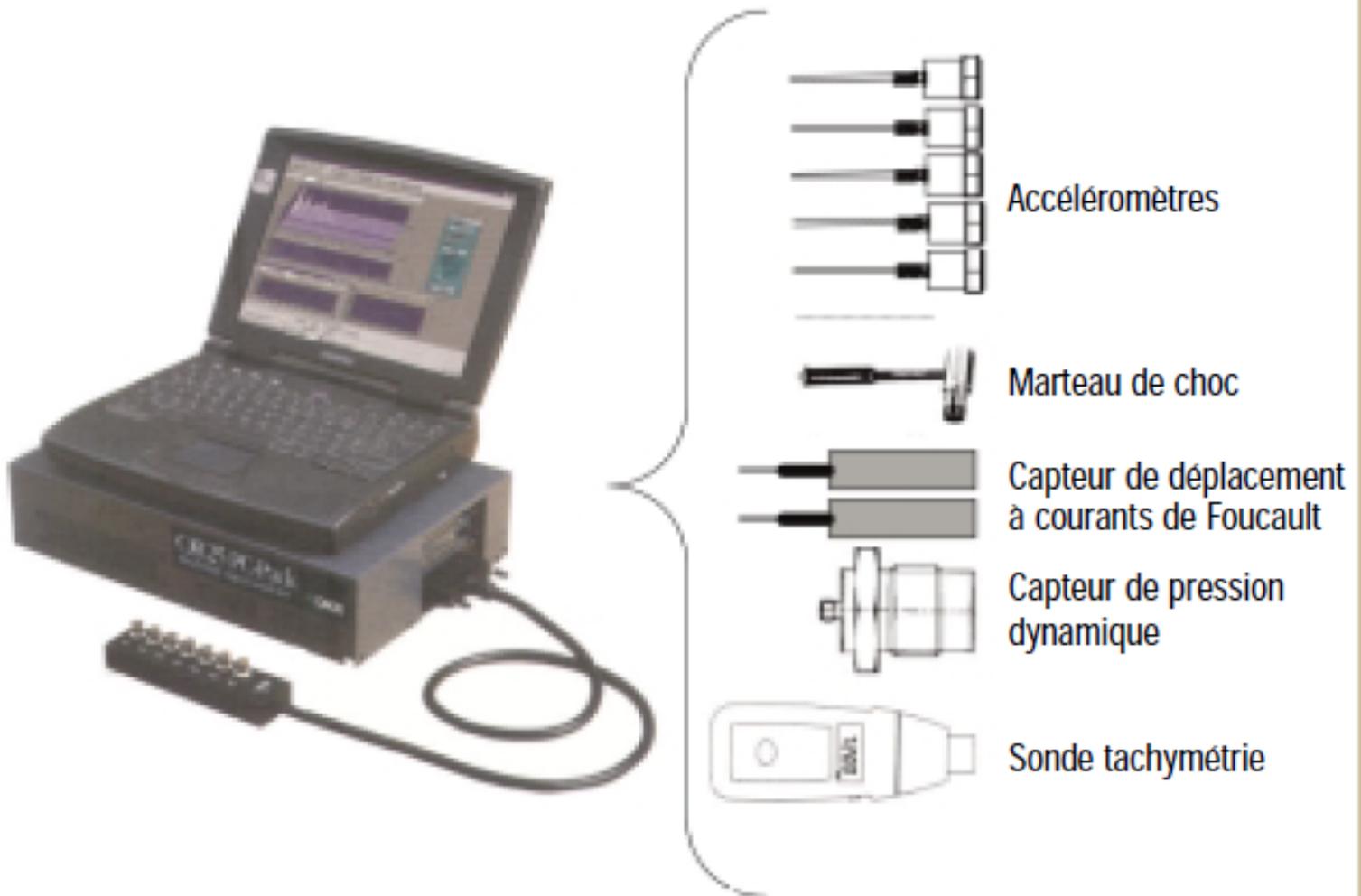


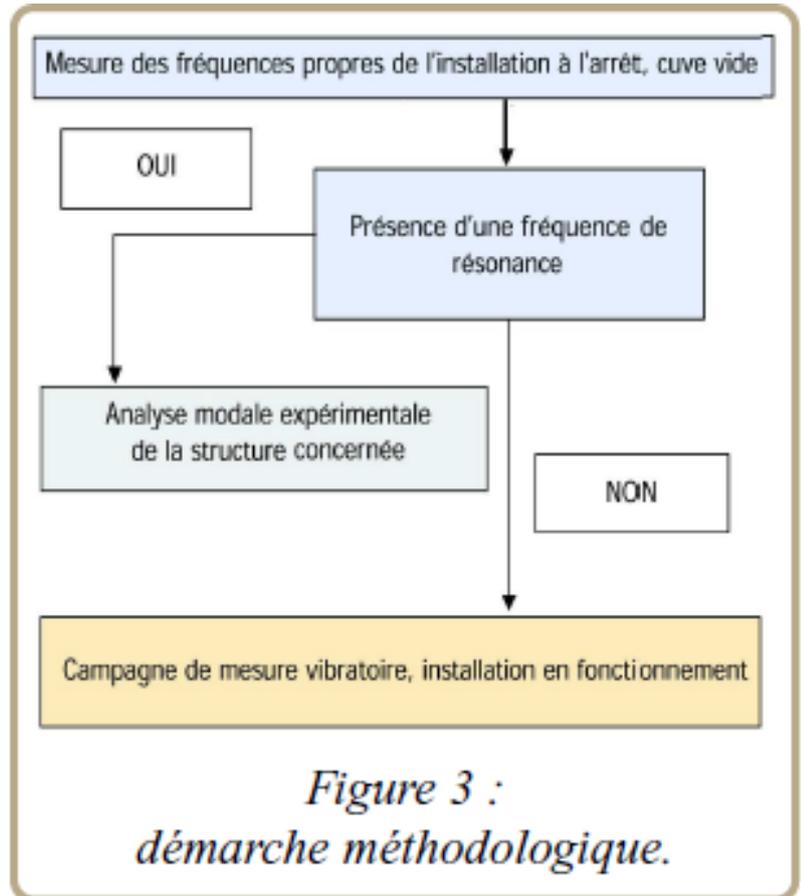
Figure 2 : schéma de l'instrumentation.

AGITATEUR			
Fréquence de rotation de l'arbre de sortie du train 2 = arbre agitateur en (Hz)	F2	$F1/(1+Z22/Z20)$	1,17 Hz
Fréquence de passage des aubes des hélices diam.1400 en (Hz)	Fp(h)	3 x F2	3,50 Hz
Fréquence de passage des aubes de la turbine diam.900 en (Hz)	Fp(t)	3 x F2	3,50 Hz

*Cinématique.*

### Démarche méthodologique (cf. figure 3)

- 1) S'assurer qu'il n'y a pas de fréquence de résonance de structure en coïncidence fréquentielle avec les excitations (cuve, agitation, groupe motoréducteur, internes).
- 2) Orienter le choix des points de mesure lors du fonctionnement de l'installation (point de mesure interne ?), transfert entre excitation et point de mesure situé à l'extérieur de la cuve.
- 3) Vérifier le bon fonctionnement du groupe motoréducteur (roulement, lignage, engrenage, etc.)
- 4) Déterminer les zones critiques pour différentes conditions de fonctionnement.
- 5) Mesurer l'évolution des fréquences propres de l'agitation en fonction du niveau pour 2 fluides.
- 6) Vérifier qu'il n'y a pas de fréquence critique de l'agitation dans la plage de vitesse pour un taux de remplissage entre 0 et 100 %.



*Figure 3 :  
démarche méthodologique.*

### Description sommaire des essais

#### Mesure des fréquences propres de l'installation à l'arrêt

- a) Mesure des fréquences propres du groupe motoréducteur sur la cuve par une excitation impulsionnelle aux points hauts moteur.
- b) Mesure des fréquences de l'arbre par une excitation impulsionnelle située juste au-dessus de la deuxième hélice tripale.
- c) Mesure des fréquences propres des internes. Ceux-ci étant répartis symétriquement, nous avons choisi les 2 internes horizontaux situés de part et d'autre du trou d'homme et l'interne radial le plus proche

- d) Mesure des fréquences propres de la cuve par une excitation impulsionnelle sur la cuve à mi-hauteur.
- e) Analyse modale de l'arbre d'agitation cuve vide.

**Campagne de mesure vibratoire installation en fonctionnement (analyse d'ordre)**

- **Cuve vide**

Enregistrement des signaux temporels lors d'une montée en vitesse entre 0 et 70 tr/min pour analyse d'ordre en temps différé, dont la pression hydraulique en pied de cuve.

- **Cuve en eau**

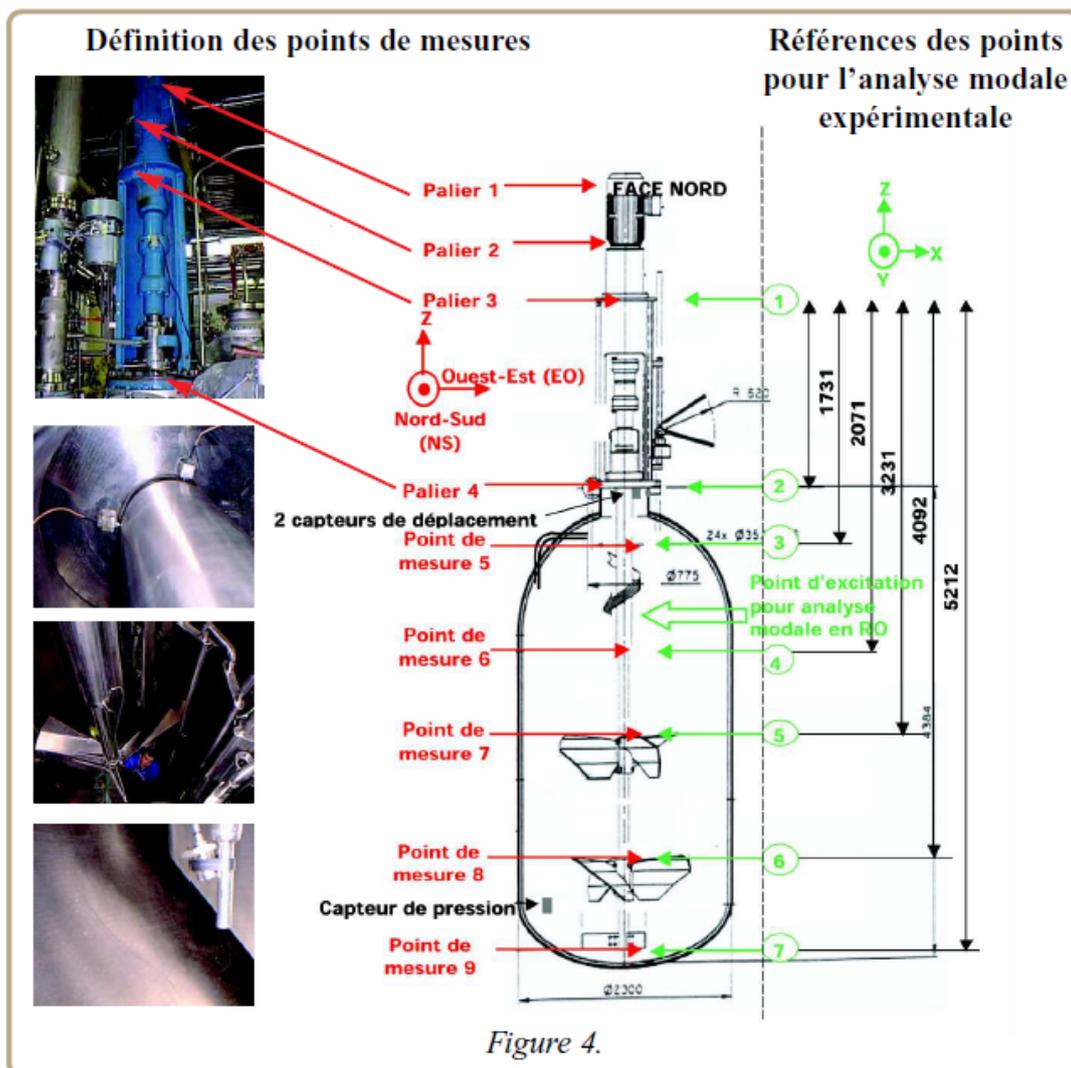
Enregistrement des signaux temporels lors de la montée en vitesse entre 0 et 70 tr/min pour 9 niveaux de remplissage.

- **Cuve en acide sulfurique 98 % (densité 1,8)**

Enregistrement des signaux temporels lors de la montée en vitesse pour les 9 niveaux de remplissage.

**Résultats des mesures et interprétation (cf. figure 4)**

Après avoir vérifié qu'il n'y avait pas de problème particulier sur le groupe motoréducteur et les internes, nous avons procédé à la mesure des fréquences propres de l'arbre.



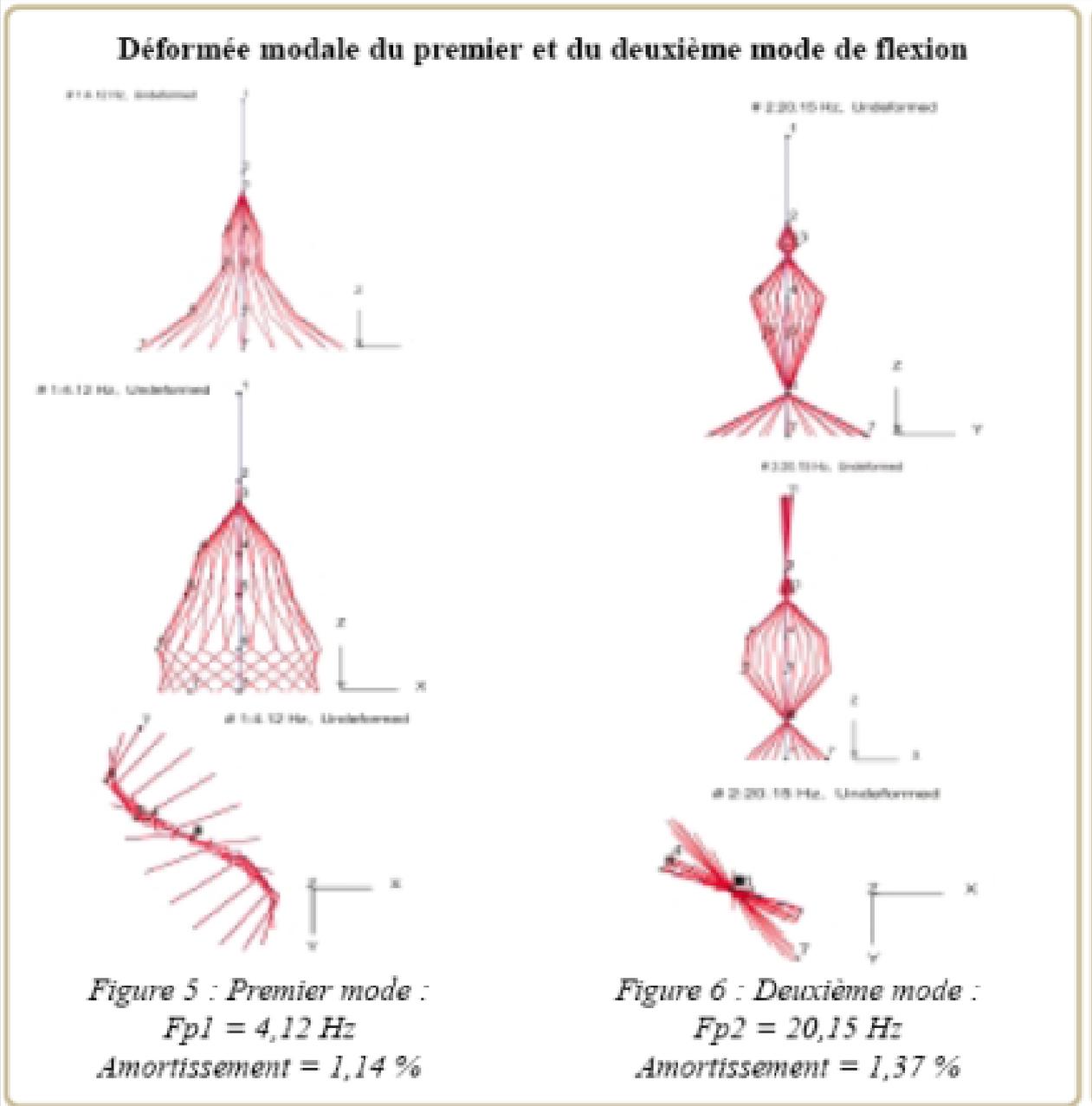
**Analyse modale expérimentale (cf. figures 5 et 6 )**

On mesure le premier mode de flexion à 4,12 H z soit 247,2 tr/min pour 256 tr/min calculé en air par la société Mixel.

Cette fréquence présente une proximité de :

- $(247,2 - 70) / 70 = 253 \%$ , ce qui est sans risque vis-à-vis de la fréquence de rotation.
- $(247,2 - 210) / 210 = 17,7 \%$  par rapport à la fréquence de passage des aubes des hélices et de la turbine, ce qui est faible.

Dans tout ce qui suit, on ne s'intéressera qu'aux proximités éventuelles entre le premier mode de flexion et la fréquence de passages des aubes des hélices et de la turbine.



**Évolution du premier mode de flexion de l'arbre à l'arrêt en fonction du niveau d'eau par excitation impulsionnelle (cf. figure 7 )**

À l'arrêt et en eau, on constate que la première fréquence propre en flexion de l'arbre diminue en fonction du niveau d'eau. Plus particulièrement, on peut constater :

- 1) une variation lors de l'immersion de la turbine caractéristique de l'apport d'une masse en bout d'arbre jusqu'au milieu de la première hélice ;
- 2) une plus forte variation entre le milieu des hélices et leur déjaugage ;
- 3) pas de variation entre les 2 hélices et au delà de la deuxième, comme si la quantité d'eau en dehors des hélices n'affectait pas la première fréquence propre ;
- 4) l'amortissement du premier mode de flexion est pratiquement inchangé entre à vide et en eau à l'arrêt ; il reste aux alentours de 3 à 4 %.

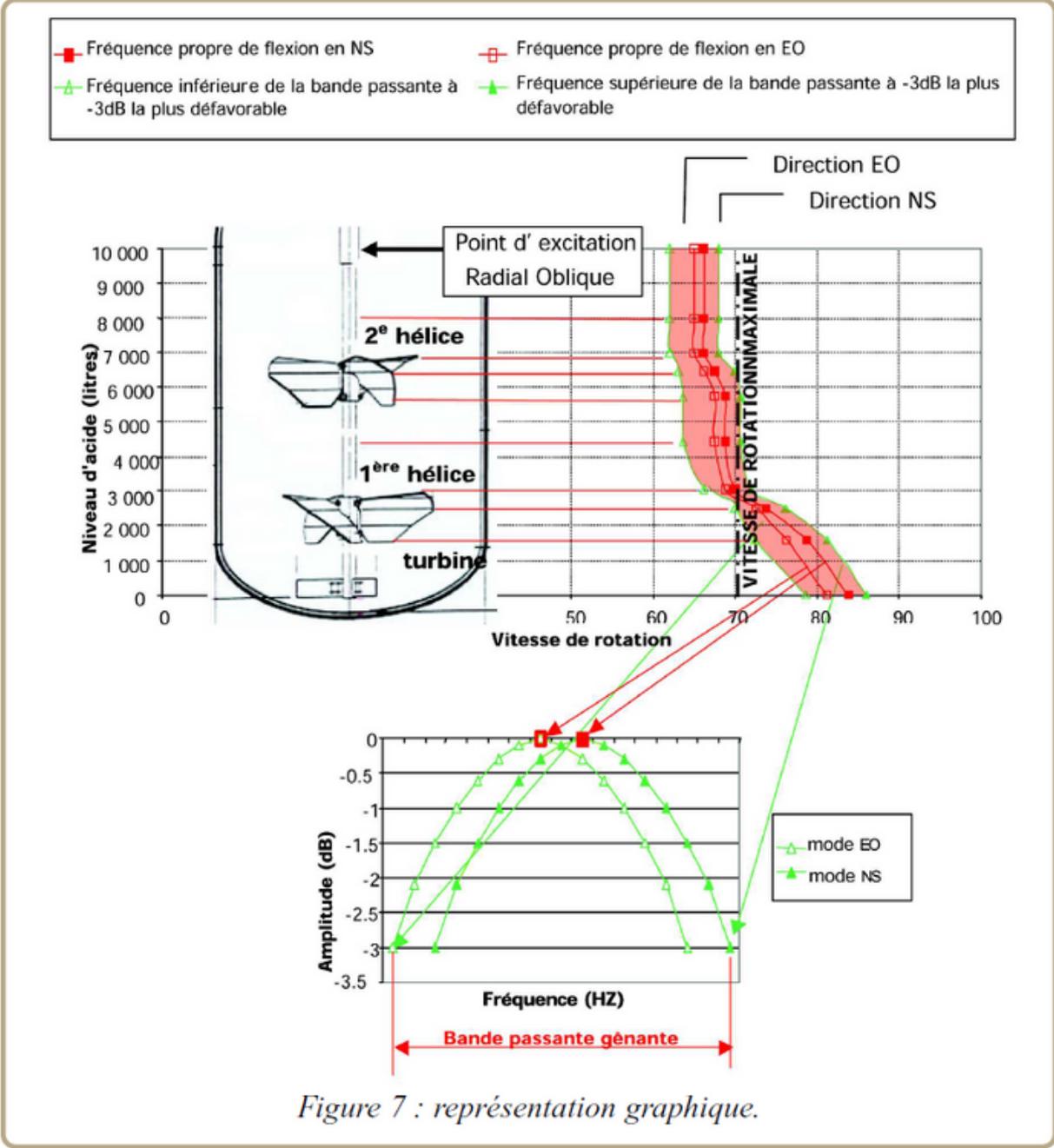


Figure 7 : représentation graphique.

## Conclusion

- 1) En eau et à l'arrêt, il existe une zone de coïncidence fréquentielle entre la fréquence de passage des aubes des hélices et du premier mode de flexion de l'arbre, ce qui correspond à une vitesse de fonctionnement critique comprise entre 62 et 70 tr/min.
- 2) L'action de la masse d'eau "ajoutée" au niveau de chaque hélice semble être prépondérante.

## Synthèse des résultats de mesure en fonctionnement en eau et en acide

Nous avons superposé l'évolution de la première fréquence propre de l'arbre en flexion lors du fonctionnement en eau et en acide.

L'observation des graphes (cf. figure 8) nous montre qu'en eau ou en acide, les arbres présentent le même comportement jusqu'à l'accostage de la deuxième hélice. À savoir :

- 1) Une forte diminution de la fréquence propre dès l'immersion de la turbine jusqu'à la première hélice.
- 2) Pas ou peu de variation jusqu'à mi-hauteur de la première hélice.
- 3) Une forte diminution lors du déjaugage de la première hélice.
- 4) Entre les 2 hélices, une augmentation de la fréquence propre jusqu'à mi-hauteur pour diminuer lors de l'accostage de la deuxième hélice.
- 5) Au niveau de la deuxième hélice, le comportement semble diverger : en effet, à mi-hauteur de la première hélice en eau la fréquence diminue alors qu'au niveau de la deuxième hélice en acide elle augmente ?

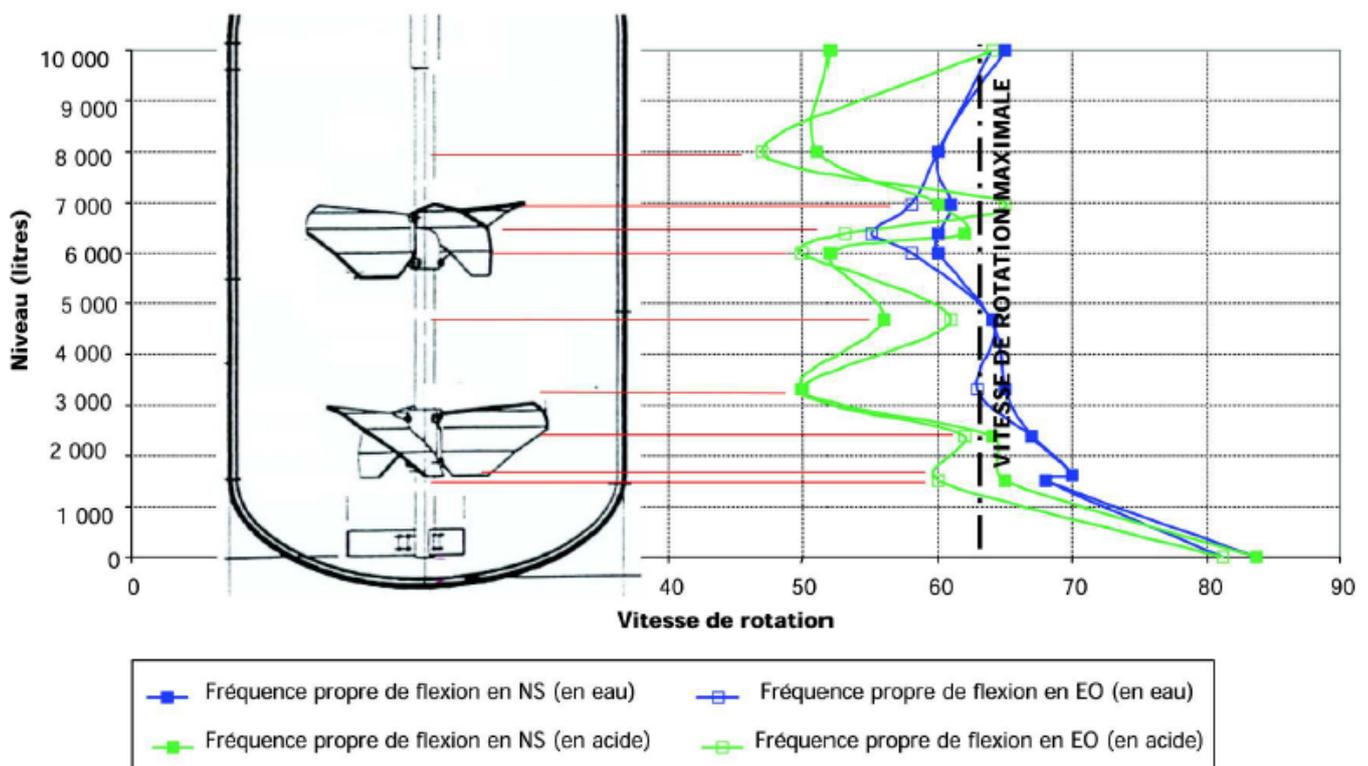


Figure 8.

Au delà de la deuxième hélice, on constate une augmentation de la fréquence critique ?!!  
Ainsi, ces augmentations de raideur "apparente" ou surtout cette forte diminution de la masse doit correspondre à un écoulement biphasique (air + eau) qui relâche l'arbre

Ces observations en première approche nous conduisent à définir une zone critique de fonctionnement pour une vitesse de rotation de l'arbre comprise :

- entre 45 et 70 tr/min en eau ;
- entre 31 et 70 tr/min en acide.

Cependant, ces fonctionnements dits "critiques" doivent être pondérés par l'évolution de l'amortissement. En effet, il passe de 3 % en air à 23 % en eau et 35 % en acide, ce qui correspond à des facteurs de surtension maximums de 17 en air à 2,1 en eau et 1,4 en acide.

Cet amortissement est bénéfique pour le bon fonctionnement de l'installation. Cependant, lors des remontées en fréquence de la critique d'arbre, l'écoulement est probablement biphasique (de l'air autour de l'hélice) et nous sommes alors en présence d'une chute de l'amortissement qui redescend en eau à 5 % et 8 %, et en acide à 8 % et 11 %. Ces faibles valeurs correspondent à des facteurs de surtension de 6,4 à 4,7 et pourraient être dangereuses. Ces points de fonctionnement sont à éviter.

Aussi, si notre analyse est plausible, il faut éviter plus particulièrement les couples de fonctionnement {vitesse + quantité de liquide} suivants pour lesquels l'amortissement est faible:

- en eau : {59 tr/min + 4 675 litres} et {55 tr/min + 3 300 litres} ;
- en acide : {52 tr/min + 1 510 litres}, {50 tr/min + 4 675 litres} et {35 tr/min + 6 960 litres} .

L'analyse des déplacements relatifs arbre/stator mesurés par les sondes à courants de Foucault situés juste après le presse étoupe nous montre :

- 1) que l'on atteint 130  $\mu\text{m}$  en eau et 200  $\mu\text{m}$  en acide pour les fréquences  $F_0$  et  $3F_0$ . Ces déplacements risquent d'endommager la garniture mécanique ;
- 2) que plus le niveau de liquide est important, plus le déplacement à la fréquence de rotation  $F_0$  est important.

## Remarque

Lors de la coïncidence fréquentielle entre la fréquence de passage des hélices  $3F_0$  et la première fréquence critique de l'arbre, ce dernier fléchit et génère du balourd.

Les comportements dynamiques de l'arbre en air et avec le liquide sont bien différents. La quantité de liquide embarqué fait descendre la première fréquence propre de l'arbre en fonction des niveaux de remplissage, pour entrer en coïncidence fréquentielle avec la fréquence de passage des aubes ( $3F_0$ ).

L'amortissement apporté par le fluide est très important et stabilise l'arbre. Cependant, il arrive que l'on ait un écoulement biphasique (air + fluide), surtout au déjaugage des hélices, qui diminue fortement cet amortissement et fait instantanément remonter la première fréquence critique de l'arbre.

Il y a donc un risque important d'avoir un contact rotor cuve.

Ainsi est-il préférable de s'assurer, lors du design de telles installations, que l'excitation du balourd et surtout celle de la fréquence de passage des hélices soient très éloignées de la première fréquence critique.

## L'expertise dynamique sur les agitateurs

Nous avons réalisé l'étude dynamique par éléments finis de l'arbre du réacteur, afin d'estimer ses déplacements à la première fréquence propre pour différents niveaux de remplissage et différents fluides.

### Maillage de la structure prise en compte des conditions aux limites

Dans le modèle ci-contre (cf. figure 9), l'arbre est maintenu par des ressorts de raideur importante ( $K = 10^9 \text{ N/m}$ ) pour modéliser la liaison avec le roulement. Le matériau est de la Hastelloy C275 ( $E = 2.05 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$  ;  $\rho = 8890 \text{ Kg/m}^3$ ).

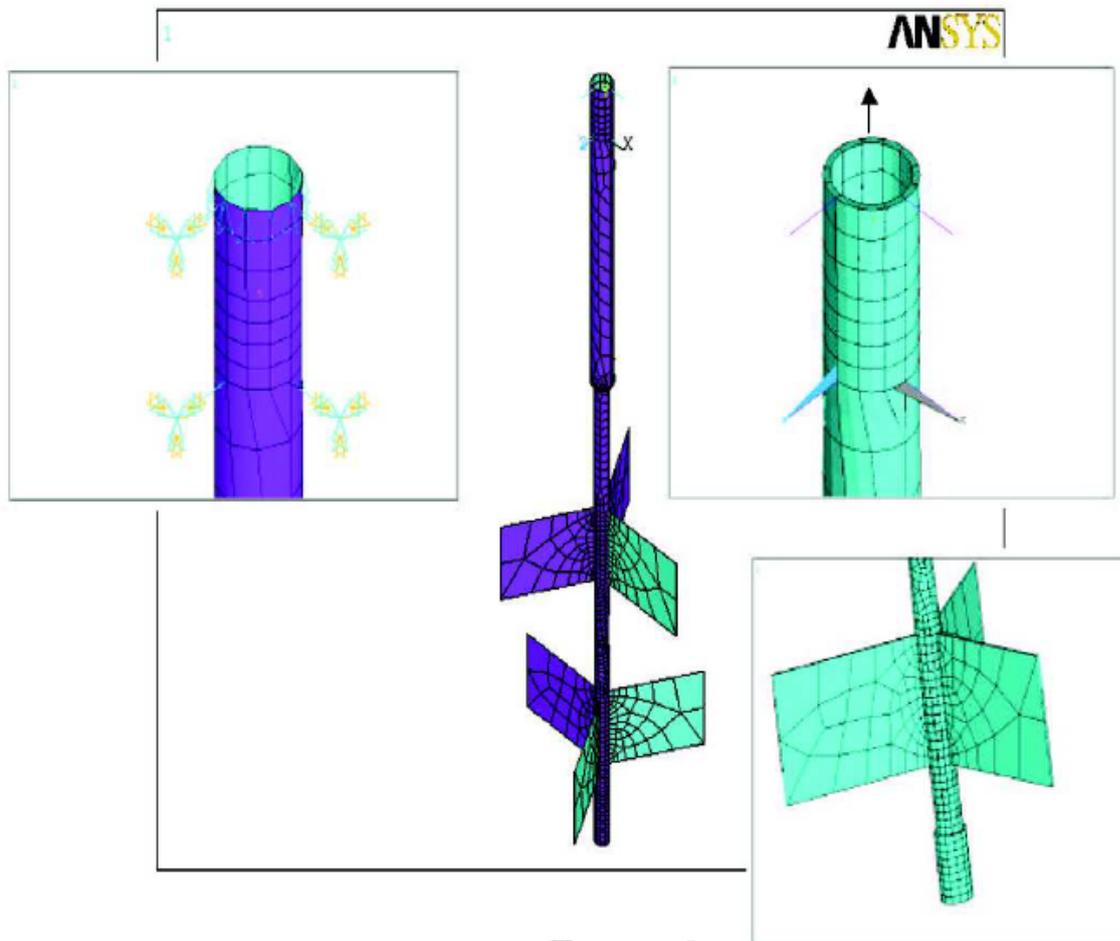
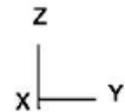
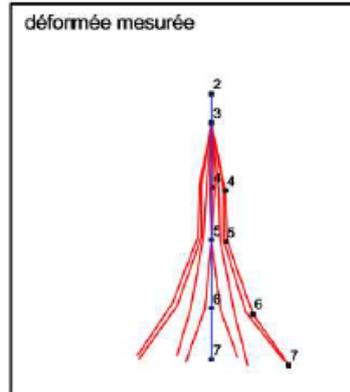
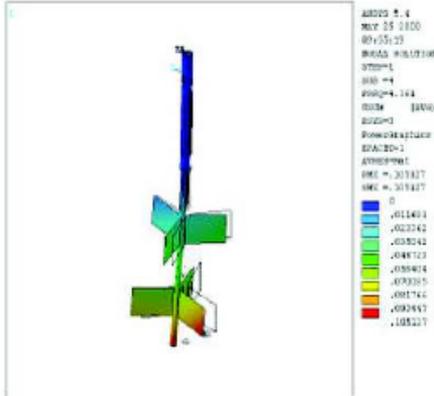


Figure 9.

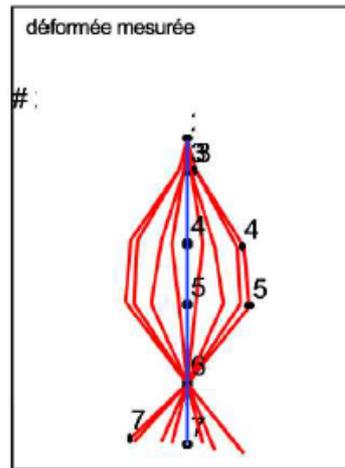
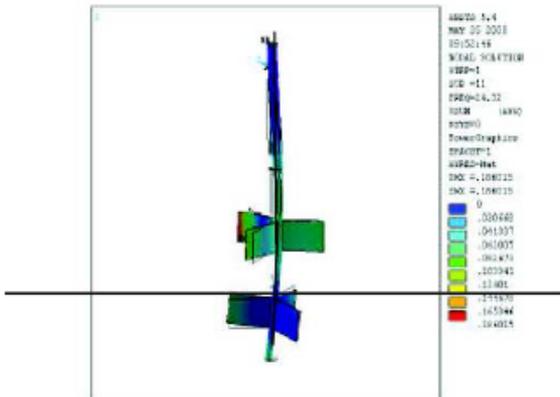
### Maillage de la structure prise en compte des conditions aux limites

La figure 10 montre la comparaison des fréquences propres et des déformées modales associées. Le premier et le deuxième mode sont recalés tant en fréquences que par leurs formes propres.

1<sup>er</sup> mode: résultat  
 éléments finis : 4.161  
 Hz - mesure : 4.12 Hz



2<sup>e</sup> mode: résultat  
 éléments finis : 24.32  
 Hz - mesure : 20.12  
 Hz



Ces 2 modes  
 sont des modes de flexion.

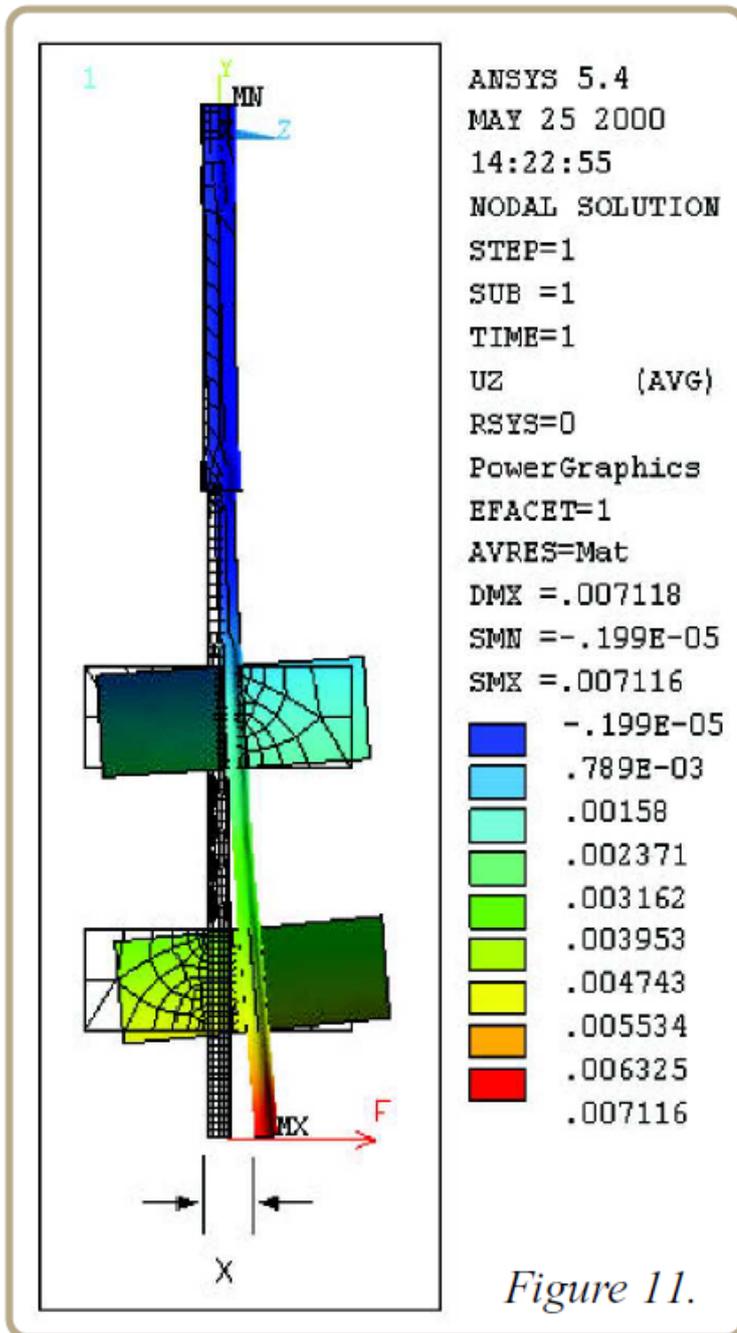
Figure 10.

## Évaluation de la raideur de flexion de l'arbre

Le couplage fluide/structure est très difficile à modéliser, notamment la répartition des forces de couplage. Notre démarche consiste à assimiler la structure à un système à un degré de liberté (masse/ressort). En supposant que l'augmentation de la masse de la structure due au fluide ne modifie pas la raideur de l'arbre, nous pouvons évaluer la quantité de fluide entraînée à la fréquence de résonance de l'arbre mesuré pour différents niveaux.

Le premier mode d'une structure étant toujours une fonction affine de la déformée statique, nous pouvons évaluer la raideur de flexion en appliquant une force connue en bout d'arbre et calculer alors le déplacement engendré, ce qui permet d'obtenir la raideur en flexion.

À travers la figure 11, nous trouvons une raideur de flexion de 70260 N/m.



## La démarche méthodologique

- Réalisation de la modélisation de l'arbre par éléments finis.
- Mise en place et/ou modification des conditions aux limites.
- Calcul des 2 premières fréquences et modes propres associés.
- Comparaison avec les résultats de l'analyse modale expérimentale.
- Calcul du rapport théorique entre le déplacement mesuré en haut de l'arbre (nœud n 411) et le déplacement le plus dangereux (nœud n 4449).
- Analyse du déplacement crête mesuré lors de la coïncidence fréquentielle.

Application du facteur de sur-tension aux déplacements maximums.

Positionnement des pales par rapport aux internes du réacteur.

## Évaluation de la masse entraînée

Connaissant expérimentalement la première fréquence propre ( $F_{p1}$ ) de l'arbre, pour différents fluides et différents taux de remplissage, ainsi que sa masse ( $M_{arbre}$ ) et sa raideur ( $K_{arbre}$ ), on obtient la masse de fluide entraînée ( $M_{fluide}$ ) pour différents fluides et différents taux de remplissage par la relation :

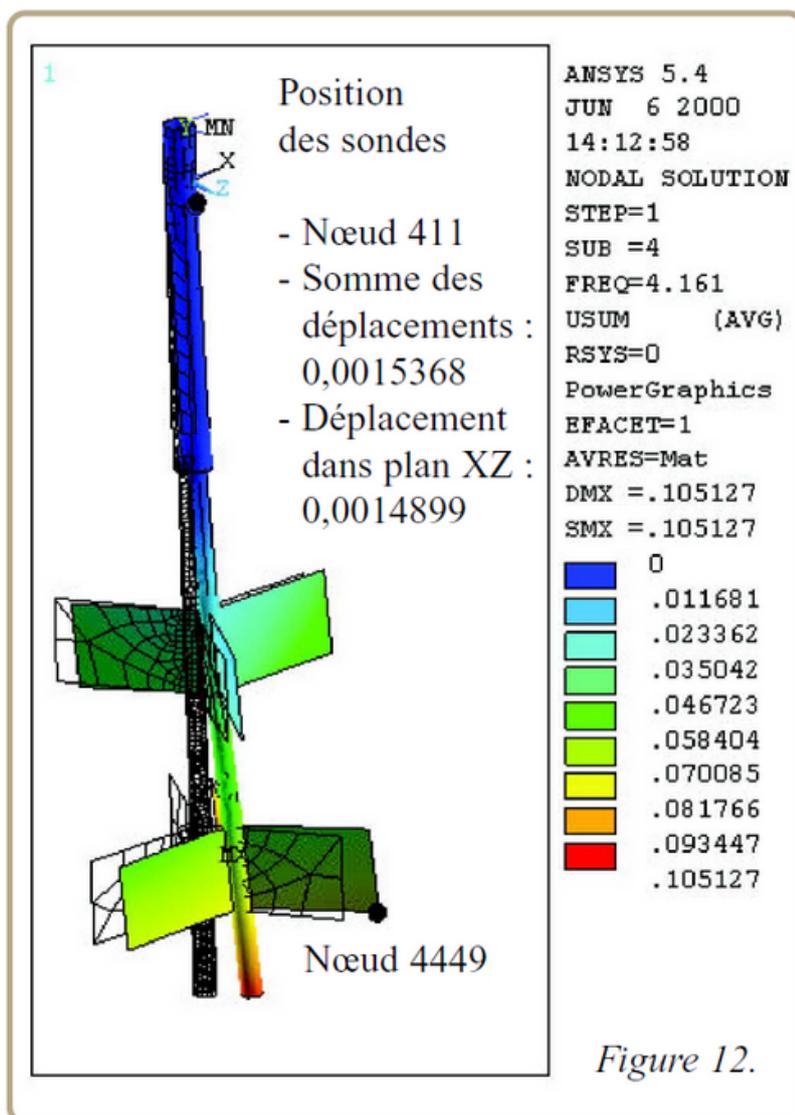
$$F_{p1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{arbre}}{M_{arbre} + M_{fluide}}}$$

## Estimation du déplacement de l'arbre

Le modèle éléments finis nous donne le rapport entre le déplacement au point de mesure positionné à la sortie du presse-étoupe et le déplacement le plus dangereux en bout de pale au nœud 4449 (cf. figure 12).

## Calcul des déplacements

Dans le tableau ci-contre, nous ne présentons que les résultats en acide, ceux en eau ne présentant pas de problème. D'après le calcul, l'hélice inférieure aurait dû toucher les internes, ce qui ne s'est pas produit dans la réalité. L'erreur de calcul serait d'au moins 6 %, ce qui est tout à fait acceptable compte tenu de nos hypothèses et justifie le rognage des hélices ainsi que la mise en place d'un système de surveillance on-line des déplacements de l'arbre mesurés au niveau du presse-étoupe.



## Déplacements en acide

Niveau (en l)	Déplacement (µm) crête mesuré sur l'arbre (au nœud 411) lors de la coïncidence fréquentielle	Déplacement maxi. (mm) de l'arbre (au nœud 4449) pondéré par le rapport 54.96	Distance mini. entre les pales et les internes (avant diminution du rayon des pales de 50mm)	Facteur de surtension maximum mesuré	Déplacement maxi. de l'arbre si pas d'amortissement (mm)
10000	619	34	32	7.6	258.4
8000	502	27.6	32	12.5	345
6960	480	26.4	32	9.7	256.1
6400	528	29	32	9.2	266.8
6000	370	20.4	32	9.2	187.7
4675	592	32.6	32	6	195.6
3300	338	18.6	32	10.3	191.6
2400	317	17.5	32	7	122.5
1510	265	14.6	32	4.6	67.2