

# AIDE AU DIAGNOSTIC

## ► L'expertise dynamique (première partie)



► Par **Henri CAMPAGNA**, dBVib Consulting  
et **Michel SENAC**, Rhodia Recherches et Technologies.

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. 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<sup>(1)</sup> dans laquelle on a réalisé :

- une étude par éléments finis afin de recalculer 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

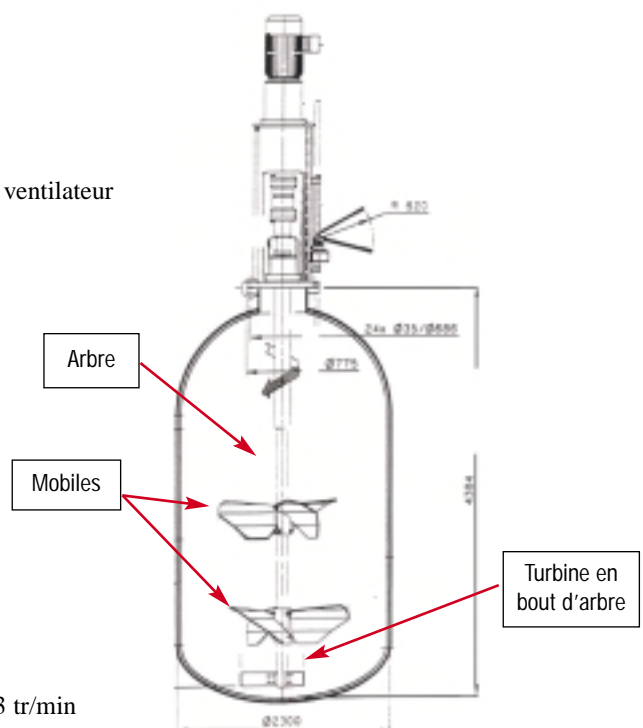


Figure 1 : schéma de l'installation.

(1) Deuxième partie à paraître dans le prochain numéro de Production Maintenance.

| 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.

## Instrumentation utilisée

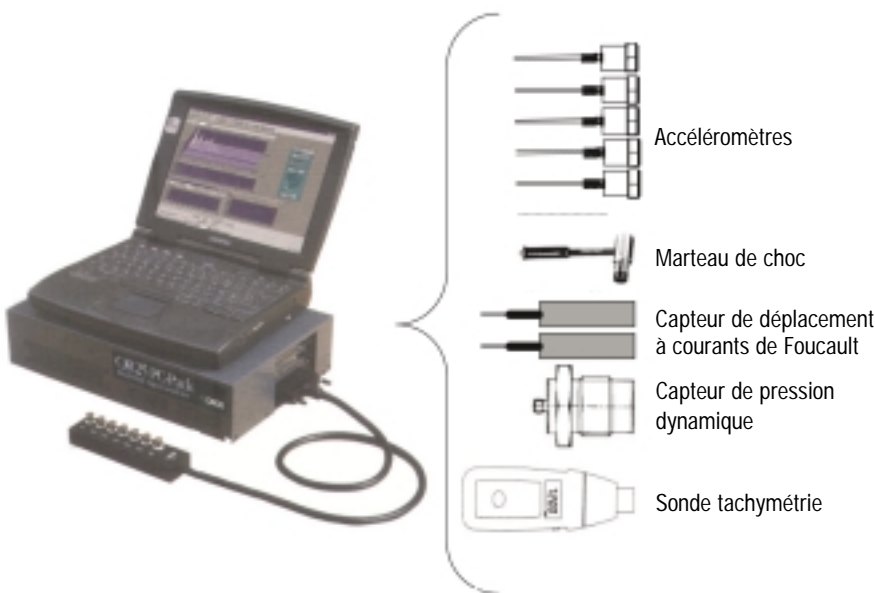


Figure 2 : schéma de l'instrumentation.

## 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.

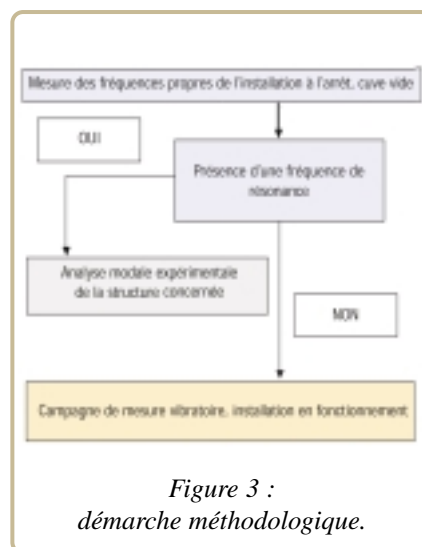


Figure 3 : démarche méthodologique.

## Démarche méthodologique (cf. figure 3)

- 1) S'assurer qu'il n'y a pas de fréquence de résonance de structure en coïnci-

dence fréquentielle avec les excitations (cuve, agitation, groupe motoréducteur, internes).

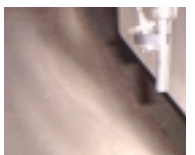
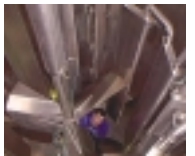
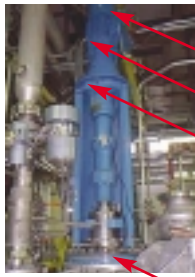
- 2) Orienter le choix des points de mesure lors du fonctionnement de l'installation (point de mesure interne ?), transfert entre excitation et point de mesure situé à l'extérieur de la cuve.
- 3) Vérifier le bon fonctionnement du groupe motoréducteur (roulement, lignage, engrenage, etc.)
- 4) Déterminer 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 %.

## 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.

## Définition des points de mesures



## Références des points pour l'analyse modale expérimentale

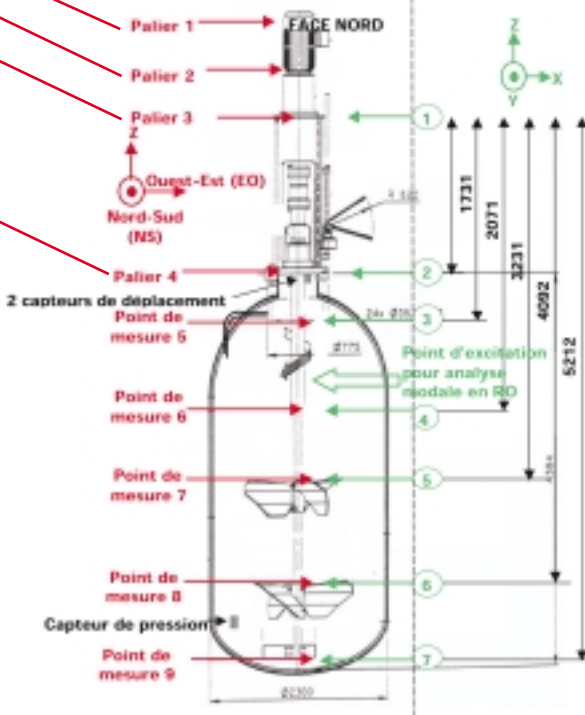


Figure 4.

## 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 de 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 Hz 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.

## Déformée modale du premier et du deuxième mode de flexion

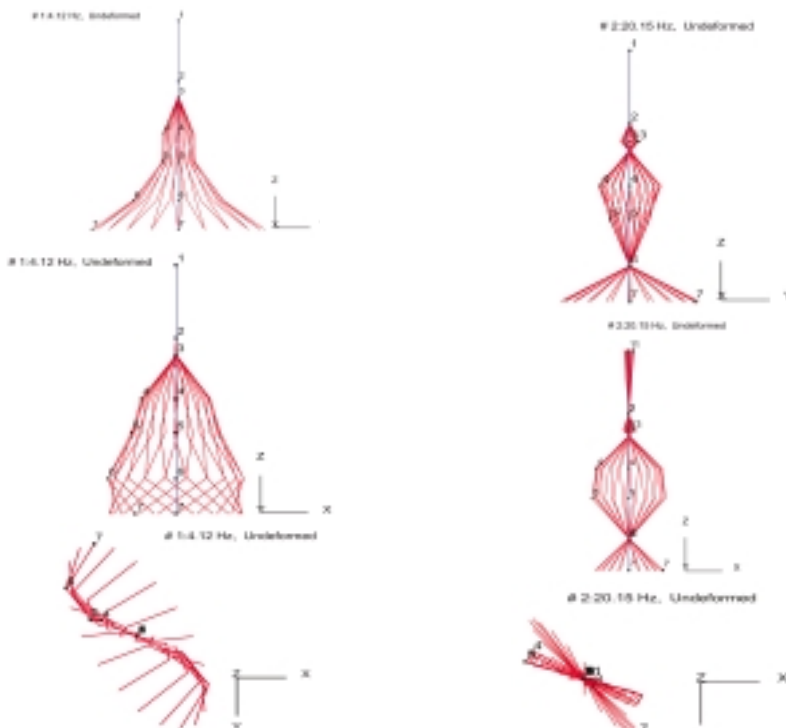


Figure 5 : Premier mode :  
Fp1 = 4,12 Hz  
Amortissement = 1,14 %

Figure 6 : Deuxième mode :  
Fp2 = 20,15 Hz  
Amortissement = 1,37 %

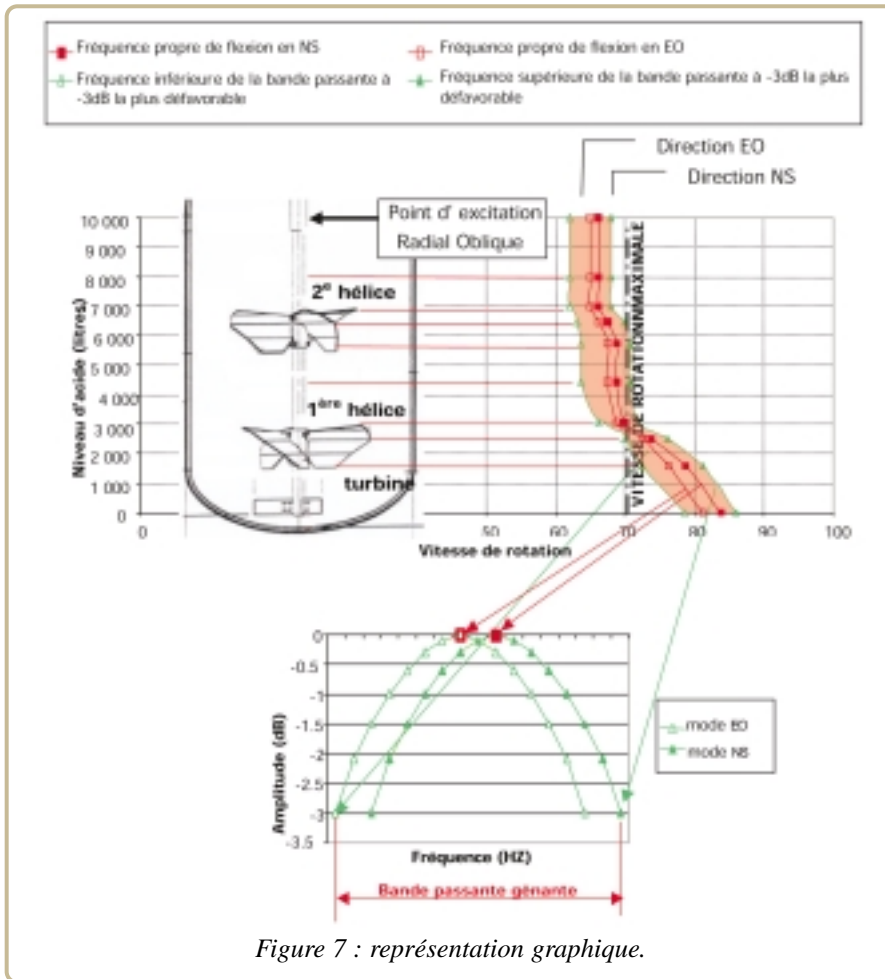


Figure 7 : représentation graphique.

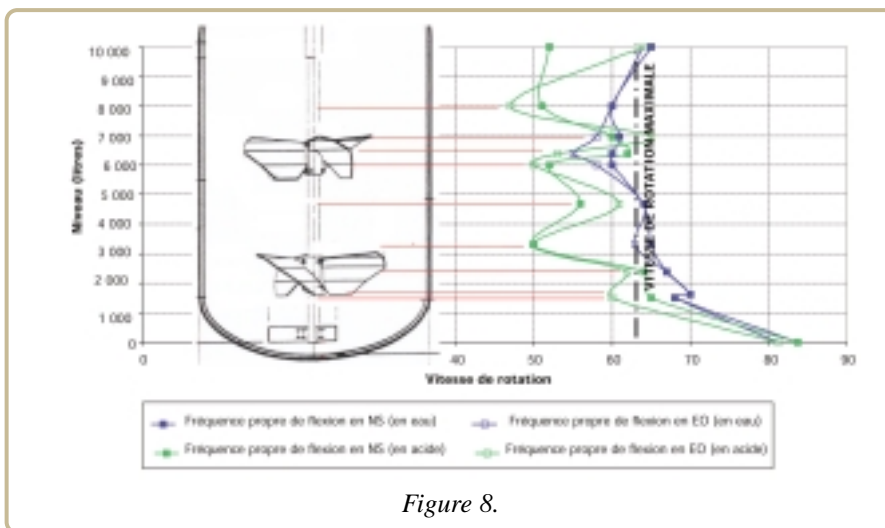


Figure 8.

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 quan-

tité 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 %.

### 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 il augmente ?

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 cri-



tique 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 remontés 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 dangereux. 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  $\mu$ m en eau et 200  $\mu$ m en acide pour les fréquences F0 et 3F0. Ces déplacements risquent d'endommager la garniture mécanique.
- 2) Plus le niveau de liquide est important, plus le déplacement à la fréquence de rotation F0 est important.

### Remarque

Lors de la coïncidence fréquentielle entre la fréquence de passage des hélices 3F0 et la première fréquence critique de l'arbre, ce dernier fléchit et génère du balourd.

### Conclusion

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 (3F0).

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.



## Une offre complète de solutions de Maintenance Conditionnelle

- Matériels de mesure des vibrations, positions, températures et paramètres procédés
- Logiciels de traitement, de surveillance et de diagnostic en ligne
- Expertises et services associés

Les solutions **Entek / Rockwell Automation** permettent de relier les informations vitales des équipements de production aux systèmes de gestion des biens d'équipement de l'entreprise (GMAO, EAM, Entreprise Asset Management, ERP).

Notre savoir-faire technologique nous permet désormais d'élargir les possibilités de nos solutions de Maintenance Conditionnelle en terme d'analyse des vibrations et des lubrifiants, grâce à de nouveaux modes de communication à travers les réseaux industriels, permettant une réduction des coûts et des temps de câblage...

Notre offre s'est agrandie dernièrement avec **XM** : le dernier né de la gamme des modules de mesure, de protection et de diagnostic des machines.

Pour plus de renseignements sur nos solutions de Maintenance Conditionnelle, contactez-nous :

### Contact

Entek  
Rockwell Automation

rasupportfr@ra.rockwell.com  
<http://www.rockwellautomation.fr>