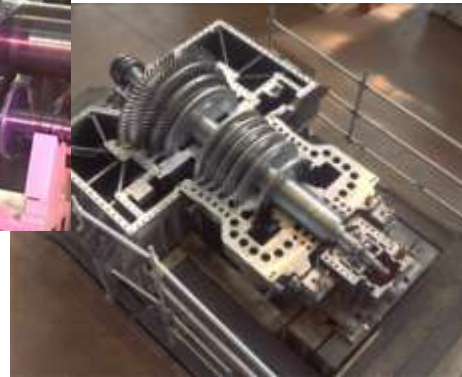
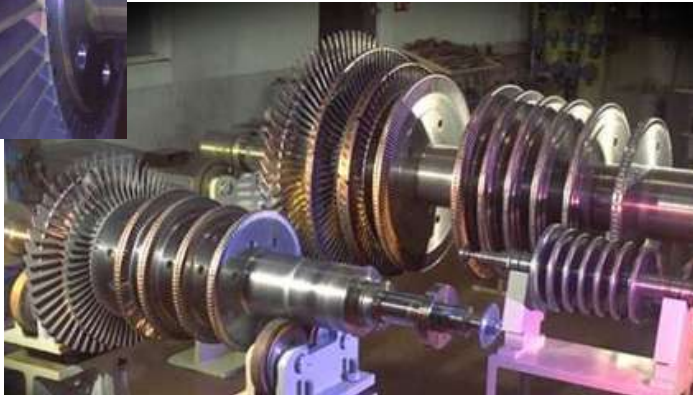




# COMPTEZ SUR DES EXPERTS

**Recette des installations par  
analyses vibratoires  
le 23 juin 2016**

## RECETTE DES INSTALLATIONS





# La réception des installations

## Pour quel type de machine et quand ?

Les machines de criticité 1, c'est-à-dire vitales ou présentant un caractère stratégique (machine non doublée, dont on n'a pas de pièces de rechange car elles sont coûteuses ou n'existent plus sur le marché, etc.) sont concernées.

Généralement, il est nécessaire de "recetter" les machines chez le constructeur avant l'installation et lors de leur mise en fonction sur le site afin de prendre en compte les interactions fluide / structure environnante et machine / structure environnante.

Il convient également de le faire avant la fin de la période de garantie ou lors de l'apparition de fortes vibrations afin d'en déterminer l'origine. Juste avant l'arrêt programmé de maintenance, cela permettra de connaître ce que l'on doit trouver avant l'ouverture et de proroger éventuellement la date d'intervention si aucun signe de dysfonctionnement n'est détecté.



# La réception des installations

## Description de la recette vibratoire des machines tournantes

Avant tout, il nous faut décrire succinctement les différentes sources de dysfonctionnement génératrices de vibrations caractéristiques. Nous pouvons les classer en huit familles :

- ✓ les phénomènes périodiques directement liés à la cinématique de la machine (balourd, lignage, engrènement...) ;
- ✓ les phénomènes périodiques non liés à la cinématique de la machine (instabilités de paliers, couplage acoustique, fréquences fantômes, fissuration d'arbre...) et les phénomènes liés à la dilatation thermique;
- ✓ les phénomènes à caractère aléatoire (cavitation, pompage, roulement) ;



# La réception des installations

- ✓ les phénomènes transitoires (choc) ;
- ✓ les phénomènes périodiques impulsifs (choc périodique), tels qu'une dent détériorée sur un pignon, une patte de fixation cassée, etc.
- ✓ la proximité de fréquences excitatrices proches de fréquences de résonance ou de fréquences critiques d'arbre ;
- ✓ les phénomènes d'isolation directe ou indirecte ;
- ✓ les phénomènes liés aux conditions de fonctionnement (accords acoustiques, tourbillons Von Karmann, cavitation...).



# La réception des installations

Face à cet ensemble de familles de machines, de conditions environnementales, de conditions de fonctionnement et de défauts éventuels différents, construire une démarche méthodologique pour la recette vibratoire d'une machine est bien sûr difficile.

Aussi, la démarche proposée quelle qu'elle soit ne sera qu'une vision partielle. Elle devra être aménagée à chaque cas particulier.

Il nous faudra dans un premier temps classer sommairement les machines en deux catégories :

- les machines à vitesse variable ou fixe ;
- les machines à paliers lisses ou à roulement (nous ne parlons pas encore des paliers magnétiques).

En effet, leur instrumentation et les méthodes d'analyse diffèrent suivant les cas.



# La réception des installations

## Les types d'analyse

Types d'analyse	Moyens	Objectifs
Analyse temporelle	Filtrage, débruitage, traitements statistiques, moyenne, écart type, Kurtosis.	Recherche de chocs et de frottements : phénomènes non périodiques. Evaluation et suppression éventuelle du run out. Représentation de l'évolution de la vitesse de rotation en fonction du temps lors d'une décélération.
Analyse temporelle multi-voies synchronisées	Lissajou multiples	Orbites de l'arbre dans les plans de mesurage, filtrage à la fréquence de rotation et ses premiers harmoniques, positionnement de l'arbre dans le cercle de jeu.
Analyse fréquentielle	Auto-spectre de puissance, fonctions de transfert et de cohérence, détection d'enveloppe, cepstrum	Analyse harmonique, recherche de chocs périodiques. Mesure de phase et de fonctions de transmissibilité.
Analyse d'ordre	Diagramme de Bode et de Nyquist	Analyse de l'évolution de l'amplitude et de la phase d'un paramètre, en fonction de la vitesse de rotation.
Analyse en colorspectrogramme	Auto-spectre de puissance et représentation en cascade	Extraire rapidement les résonances de structure, l'apparition d'un phénomène inconnu lors d'une variation de vitesse.
Analyse spécifique	Représentation Polaire, traitements statistiques	Suivi de la position moyenne de l'arbre en fonction d'un paramètre, en fonction du temps et de la vitesse de rotation. Analyse des évolutions des grandeurs surveillées au cours du temps et en régime stationnaire : corrélation et tendance.



# La réception des installations

## Les types d'analyse

Types d'analyse	Moyens	Objectifs
Analyse temps-fréquences	Transformées Fourier court-terme, Wiigner-Ville Ondelettes	Analyse des phénomènes impulsifs, non périodiques.
Analyse modale	Logiciel d'analyse modale expérimentale	Connaître les fréquences propres de structure (paliers, conduite, dalle) ou de critique d'arbre sur paliers à roulement.
Analyse de déformée en fonctionnement	Logiciel d'analyse modale expérimentale	Connaître la déformée d'une structure (par exemple tuyauterie afin d'évaluer ses contraintes à l'aide du programme Eléments Finis), installation en fonctionnement sous excitations réelles.
Démodulation	Outils de démodulation d'amplitude et de fréquence	Distinguer la modulation d'amplitude (par exemple arbre cintré) d'une modulation de fréquences (par exemple fréquence de torsion).





# La réception des installations

## Démarche méthodologique

1. La mesure des gaps (position moyenne de l'arbre par rapport aux sondes de proximité) permet d'établir l'alignement initial afin de suivre son évolution en charge (effet du coin d'huile). **(a)**

Les mesures d'impédance locale (vibration/force) sont effectuées au niveau de chaque palier selon 3 directions. **(b)**

Elles permettent d'établir :

- les résonances des parties statiques (stator) participation de l'arbre et du châssis,
- un état zéro de manière à suivre l'évolution du montage de la machine (fixations, fissurations...),
- de quantifier le comportement massique ou raideur de la machine vu du palier.

2. L'analyse de l'évolution du comportement vibratoire en fonction de la vitesse de rotation permet de déterminer :

les fréquences propres de l'arbre et du stator et de définir la proximité des fréquences excitatrices **(c)**,  
à partir d'une référence antérieure des fréquences propres d'arbre, l'apparition d'une fissuration du rotor **(c)**,  
l'apparition d'instabilité de l'arbre dans les paliers (tourbillonnement d'huile ou fouettement générant une orbite de l'arbre) **(d)**.

Le relevé des niveaux vibratoires lus sur les sondes de proximité à vitesse de rotation lente permet de quantifier le niveau de "RUN OUT", correspondant à l'erreur de mesure **(e)**.

### 1. Mesures effectuées machine à l'arrêt

**(a) Mesure des Gaps.**  
**(b) Mesure des fonctions de transfert au niveau des paliers.**



### 2. Démarrage arrêt de la machine

**(c) Analyse d'ordre**  
**(d) Analyse des sous-harmoniques.**  
**(e) Mesure du Gap à faible vitesse.**



# La réception des installations

## Démarche méthodologique

3. Ces mesures sont effectuées **pour différentes conditions de fonctionnement** de la machine:

- sur les sondes de proximité
- sur chaque palier, selon 3 directions orthogonales, à l'aide des accéléromètres.

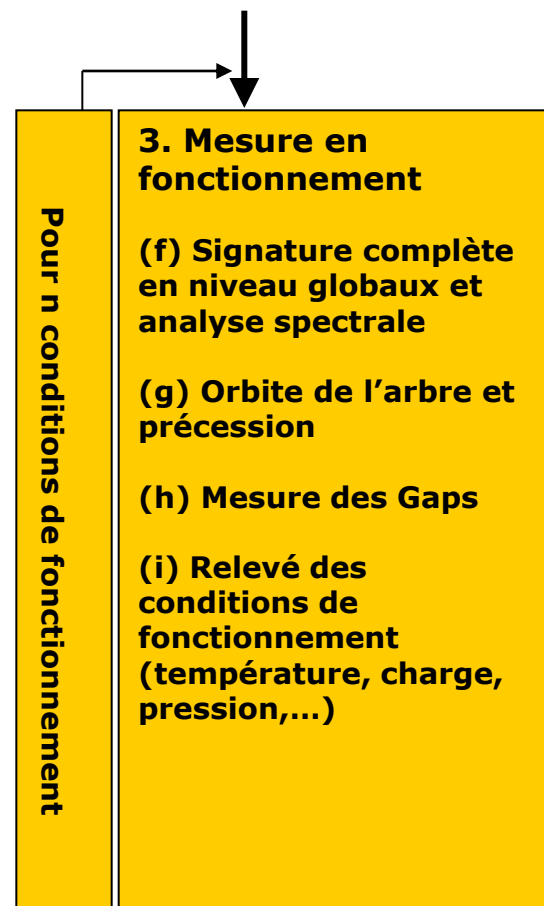
La mesure des niveaux globaux donne une référence facile de suivi **(f)**.

L'analyse spectrale judicieusement mise en oeuvre permet d'effectuer un diagnostic mécanique complet de l'installation (balourd, lignage, instabilité, usure des roues de la turbine, défauts d'engrenages et cintrage des arbres du réducteur, chocs périodiques, frottements...) **(f)**.

Le tracé des courbes de Lissajous à l'aide des sondes de proximité permet d'analyser l'orbite de l'arbre dans ses paliers **(g)**.

Le relevé des gaps sur les sondes donne l'évolution de l'alignement de la ligne d'arbre dans ses paliers en fonction des conditions de fonctionnement **(h)**.

Le relevé des paramètres caractéristiques du fonctionnement de la machine pour chaque charge permet l'étude paramétrique de son comportement vibratoire (effets thermiques, déséquilibre de charge, effets magnétiques...) **(i)**.





# La réception des installations

## Démarche méthodologique

### 4. La trame d'un rapport vibratoire est la suivante :

Sommaire récapitulatif de l'intervention et des préconisations

Objet des mesures et contexte

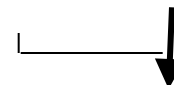
Méthodologie : référence des appareillages utilisés, présentation de l'installation, repérage des points de mesure, procédure suivie

Résultats : les spectres principaux et les tableaux récapitulatifs sont insérés dans cette partie

Analyse des résultats

Diagnostic

Annexe : détail des résultats de mesure



### 4. Dépouillement et rapport

**(j) Sommaire.**

**(k) Objet des mesures.**

**(l) Méthodologie**  
**référence des appareils.**

**(m) Résultats.**

**(n) Analyse des résultats.**

**(o) Diagnostic.**

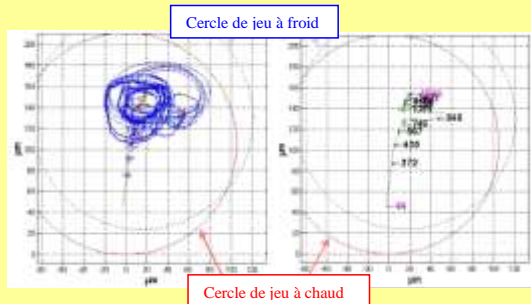
**(q) Annexe.**



# La réception des installations

## Démarche méthodologique

**Analyse de la position de l'arbre (GAP) avec la vibration de l'arbre dans les jeux de palier.**



Partie 1(a) et 3(h)

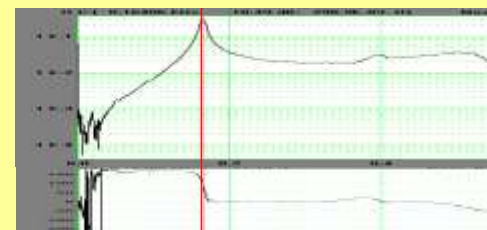
**Mesure de fonction de transfert sur site**



Partie 1(b)

**Mesure de fonctions de transfert :**

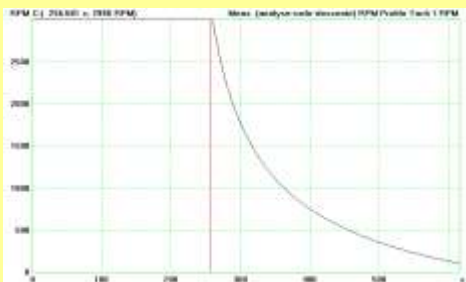
Présence d'une résonance à 164.1 Hz caractérisé par un pic en amplitude et une rotation de phase de 180°



Partie 1(b)

**Enregistrement lors d'une décélération de la vitesse en fonction du temps :**

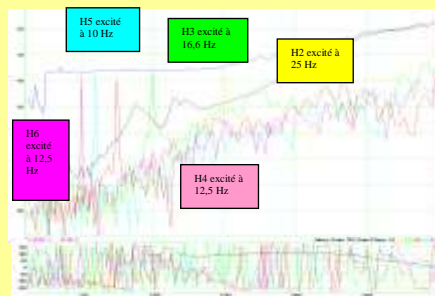
Ce graphe nous permet d'établir la loi de décélération d'une machine. Si pour une même machine cette loi varie entre deux interventions un frottement peut être diagnostiqué



Partie 2

**Analyse d'ordre :**

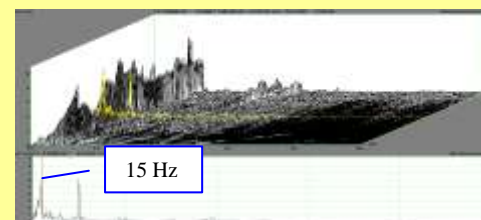
L'analyse d'ordre lors de l'arrêt de la machine met en évidence la présence d'une fréquence de résonance proche de 50 Hz, soit 3000 tr/min vitesse nominale. Cette dernière est excitée par les harmoniques 2-3-4-5-6 de la rotation lorsqu'elles arrivent à leur tour en coincidence fréquentielle.



Partie 2(c)

**Waterfall :**

Représentation de spectres en cascade. 3 axes : fréquence, amplitude et temps.



Partie 2(c)

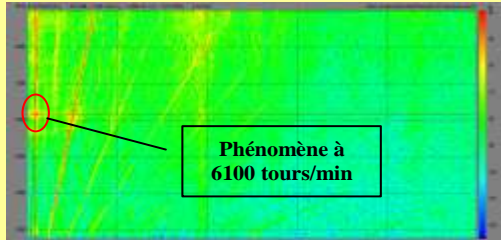


# La réception des installations

## Démarche méthodologique

### Spectrocolorgramme :

Représentation 2 axes + couleurs : fréquence et vitesse de rotation, les couleurs représentent l'amplitude.

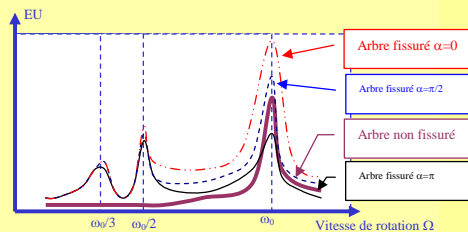


Ces deux outils sont complémentaires et nous permettent de détecter des phénomènes lors d'une analyse transitoire. Dans l'exemple on voit sur le waterfall qu'à un instant  $t$  (en jaune) représentant une vitesse de rotation de 6116 tr/min un phénomène à 15 Hz apparaît, ce phénomène est confirmé par la présence d'une tache rouge à l'intersection des axes  $f=15\text{ Hz}$  et  $Rpm=6100\text{ tr/min}$ .

Partie 2(c)

### Analyse des sous-harmoniques :

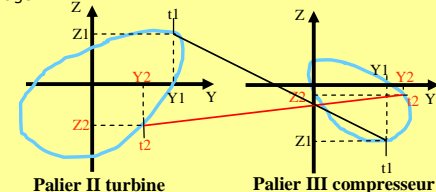
Cette analyse nous permet entre autre de détecter une éventuelle fissuration d'arbre.



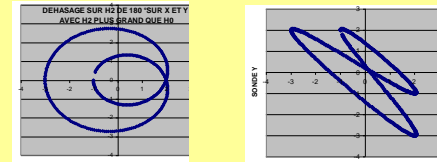
Partie 2(d)

### Analyse d'orbites :

L'analyse simultanée des orbites de chaque palier à l'aide d'un curseur synchrone afin de détecter un éventuel défaut de lignage



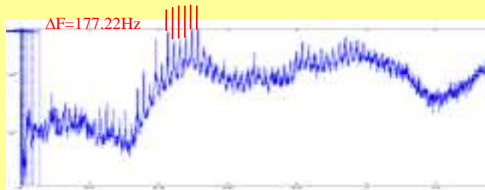
Analyse d'ordre avec défaut :



Partie 2(f)

### Détection de défauts de roulement :

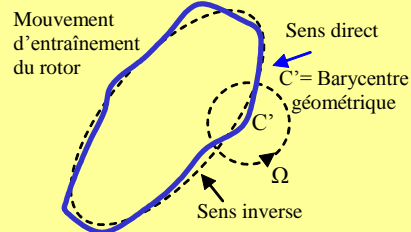
Le spectre met en évidence un défaut à 177.22 Hz qui correspond à un défaut sur la bague extérieure du roulement



Partie 3(f)

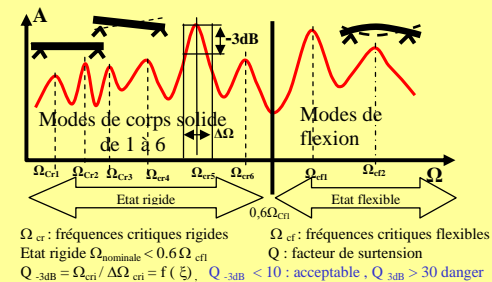
### Analyse d'orbite et précession :

L'orbite nécessite deux sondes radiales. Une sonde tachy permet d'obtenir le sens de précession.



Partie 3(g)

### Fréquence critique / fréquence exitatrice :



Partie 3(g)



# FIN