

LIVRE BLANC



Recette et expertise
vibratoire
Des machines tournantes



Edito



Par Henri CAMPAGNA, pdg de dB Vib Groupe.

Avant d'expliquer comment effectuer la recette vibratoire de machines tournantes et de présenter les différentes fonctions utilisées, il est nécessaire de se demander quel type de machine est concerné, à quel moment et de quelle manière procéder.

NOTRE GROUPE



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



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.

Comment réaliser la recette vibratoire ?

C'est l'objet de cet article et la réponse n'est pas simple. En effet, il faut avoir un certain niveau d'expertise !

Mais, où commence l'expertise ? Où finit-elle ?

Après 25 années passées à diagnostiquer le comportement dynamique des machines tournantes, on peut affirmer qu'elle commence dès que l'on fait une mesure à l'aide d'un capteur de vibration et un analyseur de fréquence, mais aussi qu'elle ne finit jamais, car de nouveaux comportements ou cas spécifiques nous apparaissent encore aujourd'hui.

L'univers du parc machines étant considérable, aucune machine n'est comparable car elles sont fabriquées différemment d'un pays à l'autre et, même s'il s'agit du même fabricant et du même type de machines, elles ont rarement les mêmes conditions de fonctionnement (vitesse, débit, pression, température, nature du fluide véhiculé...). De plus, les conditions environnementales sont elles aussi différentes (châssis, conduites, isolation, supportage, température et pollution atmosphériques...).

Ces raisons nous permettent de comprendre pourquoi les normes utilisées ne sont pas suffisantes pour qualifier le bon comportement d'une machine. Ainsi, dans ces conditions, un responsable de maintenance ou d'exploitation se trouve souvent embarrassé pour définir un cahier des charges qui lui permette, dans un premier temps du moins, de comparer les offres sous les aspects techniques.

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 caractères aléatoire (cavitation, pompage, roulement) ;
- les phénomènes transitoires (choc) ;
- les phénomènes périodiques impulsifs (choc périodique), tels qu'une dent détériorée sur un pigeon, une patte de fixation cassée, ect..;
- 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...).

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 aura au moins le mérite d'exister et pourra donc être critiquée au sens noble du terme, c'est-à-dire qu'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 méthodes d'analyse diffèrent suivant les cas.

Instrumentation

Les capteurs

On utilise généralement les *accéléromètres* pour mesurer les vibrations absolues du palier. Ces capteurs sont systématiquement employés pour les paliers à roulement. Ils sont de plusieurs types : à cisaillement, à compression, à électronique incorporée ou déportée. On fera attention, suivant le cas, à la température des paliers et à la bande passante nécessaire à l'analyse des phénomènes cinématiquement attendus.

On utilise généralement *des capteurs de déplacement à courants de Foucault* sur les paliers lisses.

Ces derniers sont montés rigidement sur la partie statorique à 90 ou 120° et mesurent les déplacements relatifs arbre / palier. Ils nous informent

sur les mouvements de l'arbre dans

son palier et nous indiquent

si l'arbre est proche de "taper" le palier. Par la grandeur physique qu'ils mesurent (le déplacement), ils nous donnent des informations basses

fréquences telles que les instabilités de l'arbre dans son palier, le

balourd et le mésalignement. C'est avec ce

type de capteur que l'on peut analyser les trajectoires de l'arbre dans ses

paliers. En complément, il est souvent préférable de les doubler par des accéléromètres montés sur les paliers.

Les analyseurs-enregistreurs

Le choix du matériel utilisé est essentiellement défini par les différents types d'analyses que l'on doit effectuer et le nombre de voies à acquérir simultanément.

En effet, celui-ci est déterminant. On ne peut pas avec un analyseur de fréquence 2 voies (type collecteur) positionnées en direction radiale verticale et horizontale sur un palier demander à l'exploitant d'une turbomachine comportant une dizaine de paliers d'effectuer 10 arrêts / démarrages à la suite ! De plus, il est alors impossible d'obtenir les phases entre paliers et rien ne nous dit qu'un démarrage est identique à l'autre. En conséquence, il est illusoire de croire qu'avec un analyseur 2 voies on puisse "recetter" une installation vitale. Ainsi un système multivoie synchrone composé d'une entrée tachy par ligne d'arbre et des fonctions enregistreurs est nécessaire.

Méthodes d'analyse, moyens et objectifs

Types d'analyse	Moyens	Objectifs
Analyse temporelle	Filtrage, débruitage, traitements statistiques, moyenne, écart type, Kurtosis	Recherche de chocs et de frottements : phénomènes non périodiques. Évaluation et suppression éventuelle du <i>run out</i> . Représentation de l'évolution de la vitesse de rotation en fonction du temps lors d'une décélération.
Analyse temporelle multivoie synchronisée	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	Autospectre 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	Autospectre 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, 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.
Analyse temps-fréquences	Transformées Fourier court terme, Wigner-Ville Ondelettes	Analyse des phénomènes impulsifs, non périodiques.
Analyse modale	Logiciel d'analyse modale expérimentale	Connaitre 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	Connaitre la déformée d'une structure (par exemple la tuyauterie afin d'évaluer ses contraintes à l'aide du programme "éléments 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 fréquence (par exemple fréquence de torsion).

Démarche méthodologique pour la recette et l'expertise des machines

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...);
- et de quantifier le comportement massique ou la raideur de la machine vus 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).

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 œuvre 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).

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.

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.

3. Mesures en fonctionnement

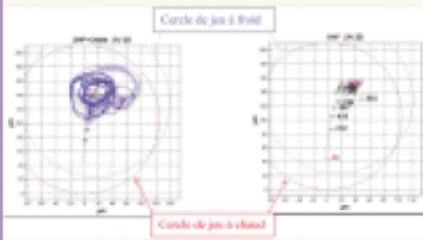
Pour *N* conditions de fonctionnement

- (f) Signature complète en niveaux globaux et analyse spectrale.
- (g) Orbites de l'arbre et précession.
- (h) Mesure des gaps.
- (i) Relevé des conditions de fonctionnement (températures, charge, pression, tension...).

4. Dépouillement et rapport

- (j) Sommaire.
- (k) Objet des mesures.
- (l) Méthodologie référence des appareils.
- (m) Résultats.
- (n) Analyse des résultats.
- (o) Diagnostic.
- (p) Annexe.

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



Parties 1 (a) et 3 (h)

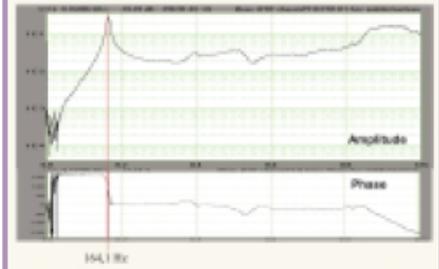
Mesure de fonction de transfert sur site



Partie 1 (b)

Mesure de fonctions de transferts : $H=\gamma/F$

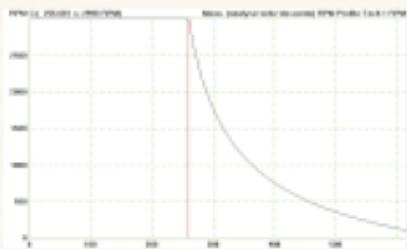
Fonction de transfert : présence d'une résonance à 164,1 Hz caractérisée par un pic en amplitude et une rotation de phase de 180°.



Partie 1 (b)

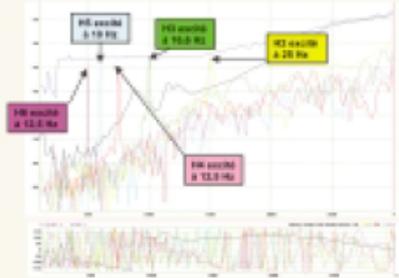
Enregistrement lors d'une décélération de la vitesse de rotation en fonction du temps

Ce graphique 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

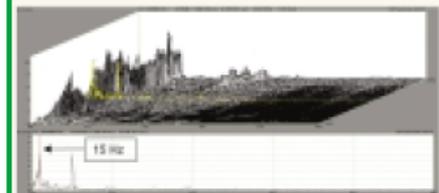
Analyse d'ordre : L'analyse d'ordre lors de l'arrêt de la machine met en évidence la présence d'une fréquence de résonance proche de 50 Hz, soit 3000 tr/min vitesse nominale. Cette dernière est excitée par les harmoniques 2-3-4-5-6 de la rotation lorsqu'elles arrivent à leur tour en coïncidence fréquentielle.



Partie 2 (c)

Waterfall

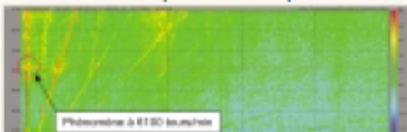
Représentation de spectres en cascade. 3 axes : fréquences, amplitudes et temps.



Partie 2 (c)

Spectrocolorgramme

Représentation 2 axes+couleurs : fréquences et vitesses de rotation, les couleurs représentent les amplitudes.



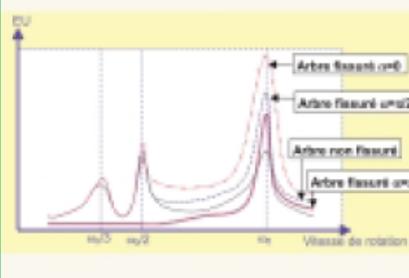
Ces deux outils (waterfall et spectrocolorgramme) sont complémentaires et nous permettent de déceler des phénomènes lors d'une analyse transitoire.

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 $f = 15$ Hz et $Rpm = 6100$ tr/min.

Partie 2 (c)

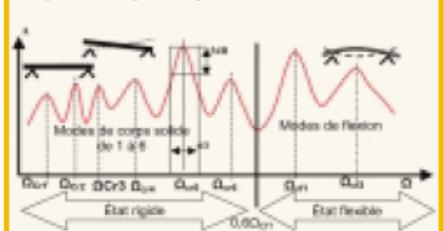
Analyse des sous-harmoniques

Cette analyse nous permet entre autres de déceler une éventuelle fissuration d'arbre.



Partie 2 (d)

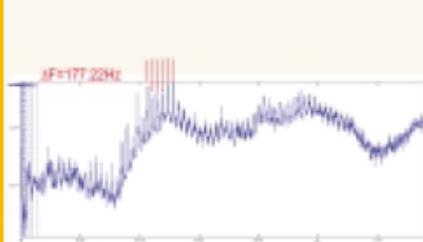
Fréquence critique / fréquences excitatrices



Ω_{cr} : fréquences critiques rigides Ω_{cf} : fréquences critiques flexibles
Etat rigide $\Omega_{max} < 0.6 \Omega_{cr1}$ Q : facteur de surtension
 $Q_{3dB} = \Omega_{cr1} / \Delta\Omega_{cr1} = f(\xi)$ $Q_{3dB} < 10$: acceptable, $Q_{3dB} > 30$ danger

Partie 3 (f)

Détection de défauts de roulement

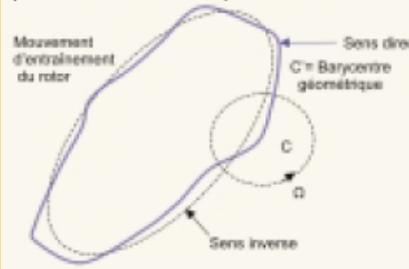


Ce spectre met en évidence un défaut à 177,22 Hz qui correspond à un défaut sur la bague extérieure du roulement.

Partie 3 (f)

Analyse d'orbite et précession

L'orbite nécessite 2 sondes radiales. Une sonde tachy permet d'obtenir le sens de la précession.

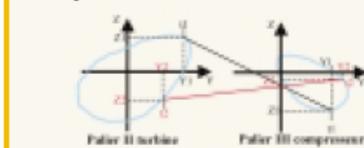


Le sens de la précession est lié aux impédances des liaisons.

Partie 3 (g)

Analyse d'orbites

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



Analyse d'orbite avec défaut



Partie 3 (g)