

Alain Boulenger
Christian Pachaud

L'USINE NOUVELLE

Aide-mémoire

Surveillance des machines par analyse des vibrations

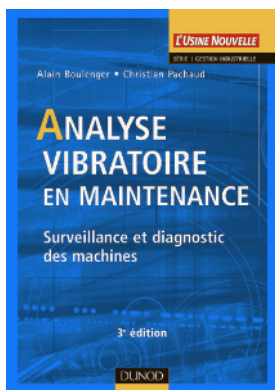


DUNOD

Aide-mémoire

**Surveillance
des machines
par analyse
des vibrations**

CHEZ LE MÊME ÉDITEUR



Alain Boulenger, Christian Pachaud
Analyse vibratoire en maintenance
3^e édition
432 pages, 2007



Alain Boulenger
Aide-mémoire
Maintenance conditionnelle
160 pages, 2008

Alain Boulenger • Christian Pachaud

Aide-mémoire

Surveillance des machines par analyse des vibrations

Préface de Claude Pichot

L'USINE NOUVELLE

DUNOD

Illustration de couverture :
© *Dragan Trifunovic - Fotolia.com*

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Paris, Dunod, 2009
ISBN 978-2-10-054190-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE

Ce qui caractérise les usines d'aujourd'hui, c'est qu'elles donnent l'impression de fonctionner seules, sans surveillance ou presque.

Depuis le système de supervision de la salle de commande d'un laminoir, d'une distillerie, d'un haut-fourneau... ou depuis l'écran de commande d'une ligne d'embouteillage, d'un carrousel de remplissage, d'un atelier de moulage..., un opérateur commande aux machines grâce à des automates. Dans ces lieux, le silence règne et la température est toujours clémente. Comme si les machines étaient devenues silencieuses, comme si l'énergie avait disparu. Seule l'action sur un clic de souris trouble ce silence pour enclencher un transfert de milliers de m³ d'un bac de traitement vers une colonne de distillation, pour lancer le conditionnement de produits qui défilent à plus de 3 000 par heure... Quel bruit a fait la pompe de 400 kW en démarrant ? Sur le terrain, plus personne pour écouter, pour sentir, pour toucher, pour ausculter. Rondier ? Un métier relégué au siècle dernier ! Des capteurs ont remplacé les rondiers. Température, pression, débit, vibrations sont surveillés en permanence par des capteurs. Et des milliers d'informations parviennent aux automates qui affichent sur des graphes en couleur la variation des paramètres suivis. D'un clic, une pompe est remise en route, un seuil de régulation est modifié.

Parmi les capteurs, ceux qui mesurent les vibrations jouent un rôle essentiel. Non que les capteurs de surveillance et de régulation des procédés soient sans importance, bien entendu.

Essentiels, les capteurs de vibration le sont parce qu'ils surveillent la santé des machines. Les vibrations sont les effets du fonctionnement des machines, un sous-produit du fonctionnement mécanique en quelque sorte. Mais un sous-produit dont les responsables de maintenance se passeraient volontiers car il est la première cause de dégradation et de panne des machines. Mesurer les

vibrations pour prévenir les pannes, les casses et les incidents indésirables est devenu une opération incontournable. Et ceux qui ne pratiquent pas encore le suivi vibratoire de leurs machines devraient s'y intéresser chaque jour un peu plus s'ils veulent améliorer la performance des équipements.

Si les principes de l'analyse vibratoire sont connus, la mise en œuvre et l'exploitation pertinente des systèmes de surveillance ne vont pas sans surprises et sans désagréments s'ils sont déployés sans un plan préétabli, sans une connaissance approfondie des pièges à éviter et des erreurs à ne pas commettre. Analyser les vibrations, certes, mais lesquelles et pour en conclure quoi ? Le but de l'analyse des vibrations ne doit pas être perdu en chemin. Ces analyses doivent conduire à la connaissance des désordres qui affectent les pièces en mouvement et permettre le remplacement juste à temps des composants incriminés. Quel roulement faut-il remplacer ? Celui côté commande du moteur ou son opposé ? Comment s'y prendre quand un parc de centaines ou de milliers de pompes doit être surveillé ?

J'ai vu et je vois encore tant d'erreurs de principe, tant d'anomalies dans la pose des capteurs, de confusions dans le choix des systèmes, de déceptions et de casses de matériels consécutives à des intentions desservies par des réalisations approximatives que j'invite chaque responsable de maintenance, chaque concepteur d'équipement, à faire de l'ouvrage de MM. Boulenger et Pachaud leur livre de référence. À lire absolument, à faire lire sans réserve pour comprendre avant de se lancer dans la mise en œuvre de la surveillance vibratoire des équipements.

À partir de cet ouvrage, pratique et théorique à la fois, fruit d'une expérience des auteurs particulièrement riche et documentée, chacun pourra tracer son chemin, rédiger les spécifications des outils à mettre en œuvre, définir les priorités d'action... sans commettre d'erreurs rédhibitoires. Pour tirer tous les bénéfices du suivi et de l'analyse vibratoire des machines.

Mais pour cela, il faudra dépasser la lecture de cette préface !

Claude Pichot
Président de l'Afim,
Association française des ingénieurs
et responsables de maintenance

TABLE DES MATIÈRES

Préface	V
Avant Propos	XI
Introduction	1
1 • Vibrations et grandeurs associées	3
1.1 Caractérisation d'une vibration	3
1.2 La fréquence	5
1.3 L'amplitude	6
1.4 Relations forces/vibration	13
1.5 Les facteurs d'influence	18
1.6 Notions de modulations	21
1.7 Notion de phases	23
1.8 Les indicateurs spécifiques des défauts de type impulsif	24
1.9 Quelques formes de signaux vibratoires typiques	29
2 • Représentation et traitement d'un signal	33
2.1 Représentation	33
2.2 Le calcul du spectre	40
2.3 Le traitement du signal	40
2.4 Temps d'acquisition du signal et résolution spectrale	53
2.5 Pouvoir de séparation	56

2.6	Le zoom	58
2.7	Représentation graphique d'un spectre	60
2.8	Typologie spectrale de quelques signaux	63
3 •	La chaîne de mesure	69
3.1	Les capteurs	72
3.2	Les conditionneurs	83
3.3	Les appareils de mesure, de collecte et d'analyse	87
3.4	Le traitement en temps réel	98
3.5	Le traitement différé ou post-traitement	98
3.6	En résumé	99
4 •	Différentes stratégies de surveillance : du dépistage au diagnostic	101
4.1	La surveillance par suivi d'indicateurs sélectionnés	102
4.2	Le diagnostic	124
4.3	Les analyses complémentaires spécifiques	157
5 •	Image vibratoire des principaux défauts	173
5.1	Déséquilibre, défaut de balourd	178
5.2	Défauts spécifiques aux paliers fluides (turbomachines)	184
5.3	Défauts d'alignement ou de flexion du rotor	188
5.4	Dégradation de l'accouplement	191
5.5	Défauts de transmission par courroies	194
5.6	Défauts induits par un desserrage	199
5.7	Défauts induits par un frottement entre rotor et stator	199
5.8	Cavitation	200
5.9	Fréquence de passage des pales, aubes, ailettes, encoches...	201
5.10	Excitation de fréquences propres de structure (résonances)	202
5.11	Machines alternatives	206
5.12	Vibrations transmises à l'environnement	206
5.13	Défauts de roulements	207

5.14	Défauts d'engrenages et d'engrènement	229
5.15	Défauts dus à une anomalie électromagnétique	242
6 •	Mise en place de la surveillance	255
	Phase 1 : Mettre en place la stratégie	255
6.1	Sélection des machines sensibles	255
6.2	Étude du contexte d'utilisation des machines à surveiller	258
6.3	Vérification de la faisabilité technique de la surveillance	258
6.4	Réflexions sur la surveillance par suivi d'indicateurs et par le diagnostic	261
6.5	Finalisation du choix de stratégie	268
6.6	Définition de la périodicité du suivi	272
6.7	Détermination des emplacements et du nombre de points de mesures	276
6.8	Estimation des coûts de surveillance et révision de la sélection	281
	Phase 2 : Démarrer la surveillance	285
6.9	Préparation et prise des mesures	285
6.10	Détermination des seuils d'intervention	295
6.11	Analyse des courbes d'évolution des indicateurs	297
6.12	Traitement, analyse, rapport de mesure et historique des pannes	301
	Conclusion	303
	Annexe	305
A.1	Norme ISO 10 816 (extraits, février 2009)	305
A.2	Norme NF EN 60 034-14 (extraits, 2003)	308

Glossaire	309
Bibliographie	313
Index alphabétique	319

AVANT PROPOS

Si l'Analyse vibratoire était la boule de cristal de la maintenance dans laquelle un « initié » pourrait identifier tous les futurs dysfonctionnements d'une machine, cela se saurait et les unités de production se disputeraient à prix d'or les faveurs des meilleurs « médiums ». Néanmoins, cette technique, extrêmement puissante lorsqu'elle est utilisée avec des moyens appropriés à chaque problème, en fonction de sa complexité et de son enjeu économique, est un outil devenu aujourd'hui indispensable à tout service Maintenance pour assurer la surveillance efficace de machines dont les pannes ou les marches en dégradé présentent un risque majeur pour la sécurité du personnel, la production ou la qualité du produit fini.

Ce manuel, écrit par des professionnels de la surveillance et du diagnostic de machines, se fonde sur plus de vingt années d'expérience quotidienne dans ce domaine et se veut éminemment concret en mettant l'accent sur les bases fondamentales de cette technique et sur sa mise en œuvre pratique sur le terrain. Il ne se veut ni scolaire ni vulgarisateur et n'a pas la prétention de regrouper toutes les connaissances actuelles dans un domaine très large et en perpétuelle évolution.

Il est destiné simplement à servir de guide à tous ceux qui désirent se familiariser avec les bases de cette technique d'investigation, qu'ils soient décideurs ou opérateurs ; les uns pour décider en toute connaissance des moyens les mieux adaptés au regard des enjeux et de l'organisation la plus rationnelle à mettre en place, les autres pour la mise en œuvre au quotidien sur le terrain.

Cet ouvrage aborde en premier lieu la nature des vibrations et les grandeurs qui les définissent en insistant sur l'importance des concepts de temps de mesure, d'effets de masque, de seuils et sur les erreurs et pièges à éviter. Il présente ensuite un certain nombre de techniques de traitement du signal classique (analyse spectrale, zoom, enveloppe, cepstre...) en mettant en exergue

les notions de résolution, de pouvoir de séparation, de durée d'analyse et de « moyennage » avant de présenter les images ou les typologies vibratoires des défauts les plus fréquemment rencontrés.

Les problèmes de vibrations liés à des résonances structurelles ne seront qu'effleurés en dépit de leur importance, car ils relèvent généralement plus de la conception que de la maintenance, exception faite des modifications de rigidité liées au vieillissement des installations (desserrage, fissuration de châssis ou d'ancrage, vieillissement de plots...). Ces problèmes, donc, généralement inhérents à la conception, à la transformation ou à l'implantation de la machine, devront être traités par un spécialiste au stade de l'étude, bien avant la réalisation des structures d'accueil et la mise en service de l'installation.

En présentant de façon simple et pratique les outils et techniques les plus utiles dans un service Maintenance, les auteurs espèrent intéresser et initier le lecteur aux applications concrètes qu'ils pourront tirer de ce puissant moyen d'investigation.

Cet ouvrage, manuel pratique de mise à l'étrier, constitue, avec « **À la découverte de la maintenance conditionnelle** » et l'« **Analyse vibratoire en maintenance** », deux ouvrages également édités par les Éditions Dunod, une trilogie graduée sur le sujet, le premier, ouvrage de vulgarisation destiné à ceux qui souhaitent se faire idée concrète sur les différentes techniques de surveillance utilisées dans le cadre de la maintenance préventive des machines, et le dernier plutôt destiné aux décideurs et aux spécialistes déjà confirmés, désireux d'aller plus loin dans l'approfondissement de leurs connaissances ou dans la maîtrise du diagnostic concernant notamment les installations à cinématique complexe et critiques au regard des différents enjeux économiques.

INTRODUCTION

Une machine se compose d'un ensemble de mécanismes et d'organes combinés destinés à transformer une énergie ou à transmettre un mouvement. Ces mécanismes, mobiles entre eux, ne peuvent fonctionner sans jeux, contraintes, efforts dynamiques et chocs dont les effets se manifestent principalement sous forme de vibrations et de bruits. Tout changement dans l'importance de ces jeux, de ces contraintes, efforts ou chocs, se traduit inmanquablement par une modification de l'intensité ou des fréquences de ces vibrations. Or, cette modification de comportement vibratoire constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie affectant la machine, cause potentielle à terme de dégradations, voire de pannes.

Cette particularité fait de l'analyse des vibrations un outil d'investigation indispensable à l'assise d'une maintenance moderne. Cet outil occupe une place privilégiée parmi les techniques de surveillance. Il permet, par la génération d'alarmes plus ou moins précoces, de signaler la présence d'un dysfonctionnement, de dépister l'apparition d'une dégradation et d'en suivre la progression, d'éviter une casse ou une dérive de la qualité du produit fabriqué, tout en permettant une action corrective programmée à bon escient au regard des impératifs de production.

La surveillance vibratoire des machines tournantes a sans doute toujours existé avec des moyens empiriques tels le toucher de la main ou l'utilisation de la pièce de monnaie dont l'équilibre sur la tranche garantissait le bon fonctionnement de la machine ou encore avec des moyens un peu plus techniques tels le vibromètre à lamelles qui permettaient, dans les cas simples, d'identifier la fréquence de la vibration d'amplitude prépondérante.

Aujourd'hui, la nécessité de communiquer, non plus avec des impressions ou des sensations subjectives, mais avec des données objectives, reproductibles et fiables, a rendu indispensable de quantifier globalement les vibrations d'une

machine par une mesure d'amplitude. Le besoin est ensuite rapidement apparu de fixer des seuils à ces valeurs et de connaître les amplitudes et les fréquences des composantes prépondérantes. Enfin, la possibilité de relier les fréquences de chaque composante vibratoire aux différentes forces dynamiques engendrées par le fonctionnement normal ou anormal de la machine et d'en interpréter les évolutions est devenue une réalité avec l'intégration à faible coût, dans les appareils de mesures de vibrations, de convertisseurs analogiques numériques et de coprocesseurs dédiés aux calculs de transformées de Fourier.

Actuellement, le sujet n'est plus de démontrer l'intérêt que présente l'utilisation de l'analyse vibratoire dans le cadre de la maintenance des machines tournantes mais d'en assimiler les notions de base et d'en connaître les limites afin de pouvoir choisir, en fonction des différents enjeux, de la complexité de la machine et de sa criticité dans le procédé, la meilleure stratégie de surveillance et les indicateurs les plus pertinents à associer.

Puisse cet ouvrage éclairer le lecteur et lui donner les bases indispensables à la mise en œuvre efficace de cet outil puissant de surveillance.

1 • VIBRATIONS ET GRANDEURS ASSOCIÉES

1.1 Caractérisation d'une vibration

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient rapide autour d'une position moyenne appelée « position d'équilibre ».

La transmission du mouvement vibratoire peut se faire soit au travers d'un gaz (généralement de l'air) ou d'un fluide (eau, huile...), soit au travers d'une matière solide comme la structure d'une machine, ses paliers, ses rotors ou encore la tuyauterie qui lui est associée... Lorsque la transmission se fait par l'air ou par un fluide, on parle de sons (ou ultrasons au-delà d'une fréquence de 20 000 Hz), et on a coutume de parler de vibrations « solidiennes » lorsqu'elle se propage par conduction au travers des composants métalliques de la machine.

C'est parce que la vibration solidienne est à la fois plus directement transmise, plus proche des anomalies recherchées et beaucoup moins polluée par l'environnement, que la surveillance de la mécanique et de l'alimentation électrique des machines est le plus souvent pratiquée par cette voie.

À l'exception de l'utilisation de quelques appareils à ultrasons généralement plus destinés à détecter la présence de fuites sur les conduites d'un fluide sous pression qu'à dépister le défaut d'un engrenage noyé au cœur d'un parc machines, ceci est vrai.

L'exemple le plus simple d'un système en vibration est sans doute donné par le mouvement d'une masselotte suspendue à un ressort et relâchée après traction.