

Inadéquation entre les normes de l'analyse vibratoire des machines tournantes et la pratique dans l'industrie

E.M. SEMMA, A. MOUSRIJ, H. GZIRI

Laboratoire de Mécanique, Management Industriel et Innovation,
FST de Settat, Université Hassan 1er, Maroc
e_semma@yahoo.fr, mousrij@gmail.com, hgziri@gmail.com

Abstract— La fixation des seuils d'alerte et de pannes constitue un point clé de la mise en place de la surveillance et du diagnostic vibratoire. Donc, après le choix des indicateurs de suivi, on est appelé à déterminer les seuils pour s'en servir dans la surveillance des machines tournantes. En effet, tout dépassement significatif de la valeur mesurée par rapport aux seuils de référence doit conduire immédiatement au déclenchement d'une procédure de diagnostic. Dans la plupart des cas, le technicien de maintenance se réfère à des normes internationales pour définir ces seuils. Cependant, l'utilisation de ces normes peut induire à l'erreur, car Les critères qu'elles proposent ne prennent pas en considération la nature des défauts. Ainsi, il est difficile à partir des seuils de ces normes de déclencher une intervention sur la machine, de modifier la période de mesure ou de mettre une surveillance poussée. Ce papier a pour but d'une part de présenter les différentes normes en vibration ainsi que leurs principales lacunes et d'autre part de proposer une démarche permettant le suivi et la fixation des seuils de surveillance vibratoire.

Keywords— *maintenance industrielle, analyse vibratoire, machines tournantes, seuil de vibration, normes, diagnostic vibratoire.*

I. INTRODUCTION

L'analyse vibratoire, en vue d'une maintenance conditionnelle, s'avère un outil puissant depuis quelques décennies pour les industries [1]. Son emploi vise à servir deux niveaux d'analyse : la surveillance et le diagnostic de l'état des équipements [2]. Le but de la surveillance est de suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations. Par conséquent, une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence constituant la signature, alerte généralement le technicien sur un dysfonctionnement probable [3].

Généralement, le système de diagnostic utilisé dans les installations industrielles consiste à obtenir une amplitude de vibration globale [4], et de faire une analyse de tendance.

Quand une valeur d'alarme est atteinte, l'analyse spectrale doit être effectuée [5]. Après le dépassement de l'alarme de panne, la séquence d'actions suivantes est recommandée: (i) obtenir le spectre; (ii) contrôler l'état des harmoniques anormales; (iii) entreprendre une tâche de maintenance pour faire disparaître ces harmoniques [6].

La plupart des fabricants et des décideurs se réfèrent à des normes de vibrations pour fixer les seuils d'alarme vibratoire [7]. Or, malgré qu'il existe une variété de normes qui sont élaborées et publiées par des organisations internationales [8], on trouve une difficulté pour déterminer les seuils de référence afin d'assurer un bon suivi vibratoire. Ainsi, l'exploitation des normes d'évaluation a montré qu'il y a encore des lacunes qui empêchent les industries d'atteindre les objectifs souhaités de cette forme de maintenance.

La norme seule reste insuffisante pour fiabiliser le suivi d'analyse vibratoire. Vu qu'il n'y a pas un lien direct avec les défauts recherchés et les seuils de référence, on doit chercher d'autres méthodes qui prennent en considération les conditions d'exploitation (charge, débit, température, variabilité...) [3,9]. La constance des conditions d'utilisation d'une collecte à l'autre se vérifie très rarement en pratique et un dépassement même significatif de la valeur mesurée ne traduit pas forcément l'apparition d'un défaut. Dans ce papier, nous allons mettre le point sur les différentes normes qui sont apparues ces dernières décennies en montrant leurs faiblesses dans la pratique ou sur le terrain. En outre, nous allons proposer une démarche pour définir les différents seuils de surveillance vibratoire.

II. LES NORMES DE VIBRATIONS

Au cours des soixante-dix dernières années, des améliorations spectaculaires ont eu lieu dans la technologie et la pratique utilisées pour la mesure, la surveillance et l'analyse des vibrations des machines tournantes (fig. 1). Parmi lesquelles on cite l'apparition des normes pour l'évaluation des mesures vibratoires [10].

Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, CPI 2015, 2-4 Décembre 2015, Tanger - Maroc.

Xth International Conference on Integrated Design and Production, CPI 2015, December 2-4, 2015, Tangier - Morocco.

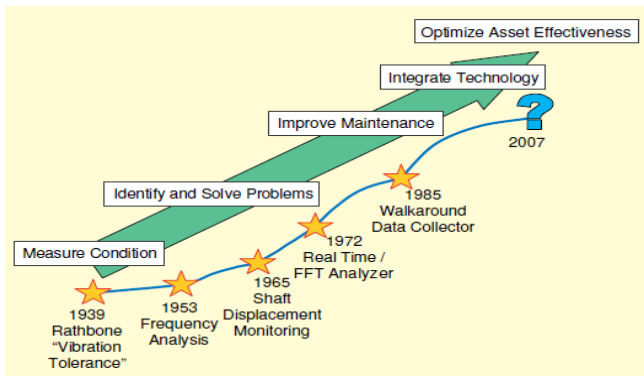


Fig. 1. Evolution des techniques de mesure et de surveillance en analyse vibratoire [10].

Les normes sont des accords documentés contenant des spécifications techniques ou autres critères précis destinés à être utilisés systématiquement en tant que règles, lignes directrices ou définitions de caractéristiques, et ce, pour assurer que des matériaux, produits, processus et services sont aptes à leur emploi [8]. Dans le domaine d'analyse vibratoire, l'organisation internationale de normalisation (ISO) a publié en 1974 deux normes de vibration [10]:

- ISO 2372 : Vibrations mécaniques des machines ayant une vitesse de fonctionnement comprise entre 10 et 200 tr/s – Base pour l'élaboration des normes d'évaluation (sur la base du VDI allemand 2056) ;
- ISO 3945 : Vibrations mécaniques des grandes machines tournantes dans la gamme des vitesses comprises entre 10 et 200 tr/s - Mesurage et évaluation de l'intensité vibratoire in situ.

Aujourd'hui, il existe une variété de normes qui sont largement acceptées et appliquées dans le domaine de la maintenance et de la recherche scientifique [11] :

- ISO 2372, 3945, 7919 et 10816
- VDI 2056, DIN 45665 (Allemagne)
- BS 4675 (Angleterre)
- API standard 610, 612, 613, 617, 619,... (USA)
- CDA-MS-NVSH 107 (Canada)

Ces normes visent, en premier lieu, la facilitation de la surveillance vibratoire en termes de fixation des seuils, d'établissement et classification des machines tournantes et de choix des méthodes de prise et traitement de mesures. Elles ont été standardisées avec des critères légèrement différents selon le pays et selon la puissance, le type de la machine ou l'application.

Pour l'exploitation de ces normes, la mesure doit être effectuée lorsque le rotor et les paliers ont atteint leur régime de stabilité normal de température et lorsque la machine tourne dans les conditions nominales (tension, débit, pression, charge, vitesse,...) [11]. Malheureusement, chaque machine est installée de façon différente et doit travailler dans des conditions imprévisibles. Il est donc utopique de vouloir obtenir un niveau absolu d'intensité vibratoire [12].

III. PROBLÈME DE DÉTERMINATION DES SEUILS DE VIBRATIONS

En industrie, les machines même identiques ont rarement les mêmes conditions de fonctionnement et d'installation. En plus, les milieux environnants sont aussi différents (température, isolation, humidité, pollution atmosphérique,...). Ainsi, dans ces conditions, les décideurs en maintenance trouvent souvent des difficultés pour définir des critères de choix pour mettre en place une maintenance conditionnelle [13].

Prenons l'exemple de deux broyeurs installés dans une même installation. Ils ont tous les deux le même schéma cinématique (Fig. 2) et les mêmes caractéristiques (fig. 3).

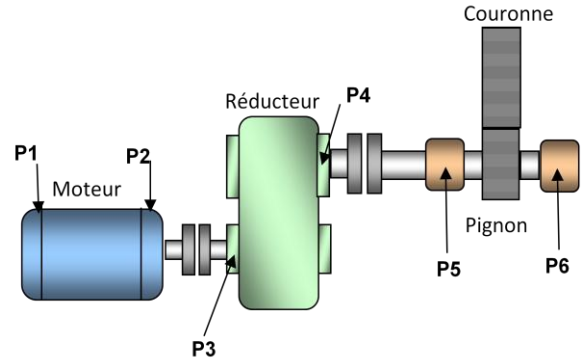


Fig. 2. Schéma cinématique des deux broyeurs étudiés

Moteur		Pignon d'attaque	
Vitesse nominale :	992 t/mn	Diamètre primitif	636 mm
Puissance :	1750 kw	Nombre de dents	21
Alimentation :	6Kv		
Réducteur:		Couronne:	
Puissance :	2100 ch	Diamètre primitif	φ664 mm
Vitesse d'entrée	985 t/mn	Vitesse	15 t/mn
Vitesse de sortie	150 t/mn	Puissance absorbée	1550 kw
		Nombre de dents	220

Fig. 3. Caractéristique des deux broyeurs étudiés.

Parmi les mesures vibratoires faites sur les points P1 à P6, les figures 4, 5 et 6 présentent la tranquillité de marche de ces deux broyeurs mesurée sur les points P3, P4 et P5 dans la direction horizontale. Ces mesures ont été enregistrées en 2014.

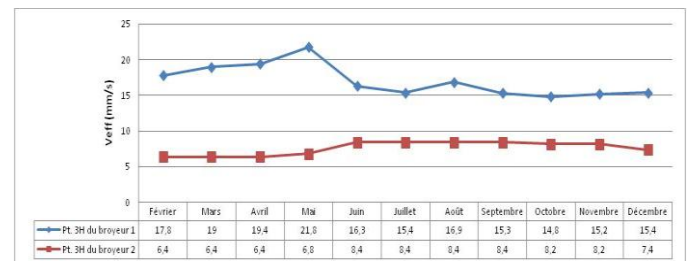


Fig. 4. Tranquillité de marche des deux broyeurs 1 & 2 mesurée sur le point P3.

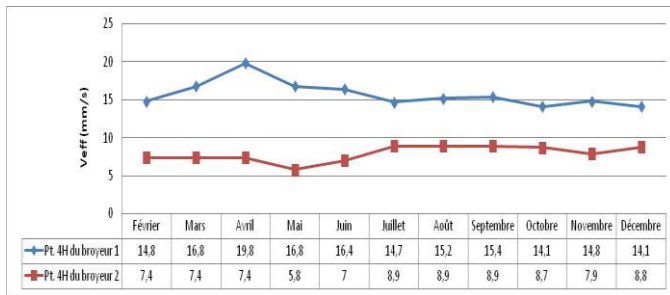


Fig. 5. Tranquillité de marche des deux broyeurs 1& 2 mesurée sur le point P4.

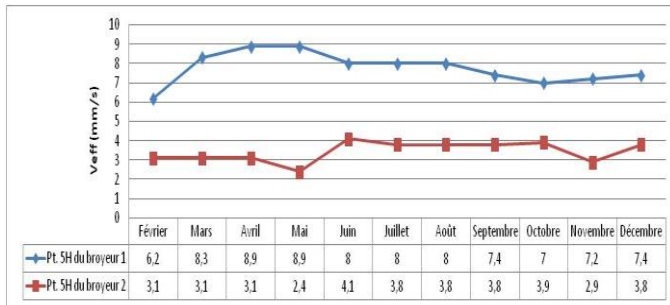


Fig. 6. Tranquillité de marche des deux broyeurs 1& 2 mesurée sur le point P5.

Ces trois graphiques montrent qu'il y a un écart énorme entre les vibrations enregistrées, aux mêmes points, pour les deux broyeurs supposés être identiques. En outre, les valeurs de vibrations du broyeur 1 dépassent les seuils d'alarme critique recommandés par la norme 10816 (voir le groupe III de la norme au niveau de la fig. 7), et le broyeur continue à fonctionner normalement sans qu'il y ait de dysfonctionnement. Ainsi, c'est difficile dans cette situation pour un maintenancier de déterminer des seuils de vibrations permettant un bon suivi vibratoire.

Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		good	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		satisfactory	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		unsatisfactory	
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
0.71	28.0		unacceptable		
1.10	45.0				

Fig. 7. Seuils recommandés par la norme ISO 10816

Cet exemple montre clairement la limite des normes dans la détermination des seuils de vibrations. Notre travail consistera alors à proposer une démarche efficace pour l'évaluation des seuils de vibrations quelque soit les

conditions de fonctionnement de la machine à surveiller et du milieu environnant.

IV. LES LACUNES DES NORMES DANS LA DÉTERMINATION DES SEUILS DE VIBRATIONS

Pour assurer la surveillance vibratoire, on procède à la mesure du niveau global de la vibration soit en déplacement, soit en vitesse ou soit en accélération [11,7]. Aujourd'hui, les normes donnent des valeurs de référence de déplacement et de vitesse [10,2]. Quant à l'accélération qui est un indicateur général, elle est utilisée par des experts pour surveiller les roulements et les réducteurs.

Pour un indicateur scalaire donné, il faut tout d'abord choisir un capteur adapté et une bande de fréquences avant d'aborder la mesure [12]. Notant que chaque norme de vibration permet l'évaluation de l'état de la machine dans une bande de fréquences mentionnée dans la norme (tableau. I) [2].

Tableau. I Bande de fréquences par indicateur de mesure vibratoire [2].

Indicateur	Bande de fréquences de mesure	Phénomènes surveillés	Observation
Déplacement crête à crête (Dcc)	[10 – 1000 Hz]	Basses fréquences	Norme API (Pétrochimie)
Vitesse (Veff)	[10 – 1000 Hz]	Basses et hautes fréquences	Norme Iso 10 816
Accélération (Aeff)	[1000–30000 Hz]	Hautes fréquences	Indicateur général

Cependant, l'utilisation de normes pour la définition des valeurs de référence, notamment de la norme 10 816 qui est la plus utilisée [13], n'a pas donné satisfaction dans les industries [12,14]. Car, il faut noter qu'il y a une large gamme de défauts (déséquilibre, désalignement, frottement, instabilité de paliers, jeux, desserrage, déversement de bague de roulements, écaillage de roulements, écaillage de dentures...), mais les critères donnés par cette norme ne sont malheureusement utilisables que pour surveiller les défauts de déséquilibre [12]. Alors que pour la sévérité des autres défauts de vibration, les critères proposés sont, plus souvent, beaucoup trop élevés. Ainsi, au regard de la norme, le fait de se situer dans une plage admissible de mesure ne signifie pas obligatoirement que celle-ci ne présente pas déjà des signes de dégradation accélérée ou normale.

Se référer à des normes de vibrations pour fixer des seuils présente beaucoup de lacunes :

- Les seuils donnés n'ont pas de relation directe avec la cause qui engendre la panne. Ce qui laisse une ambiguïté chez les chargés de la surveillance vibratoire.
- Les seuils ne prennent pas en considération l'effet de masque qui reste un problème important limitant considérablement la fiabilité de l'utilisation des normes. En effet, la mesure étant « globale », l'énergie

vibratoire mesurée est la somme de toutes les énergies vibratoires induites par les forces dynamiques «normales» et «anormales» dont la machine est le siège. Si A_{GN} représente l'amplitude efficace de la contribution vibratoire des forces dynamiques induites par le fonctionnement normal de la machine et A_{GD} l'amplitude efficace de celle induite par l'ensemble des défauts ou dysfonctionnements, l'amplitude efficace globale mesurée sera égale à $\sqrt{A_{GN}^2 + A_{GD}^2} = A_{GN} \sqrt{1 + \left(\frac{A_{GD}}{A_{GN}}\right)^2}$. Cette relation montre bien que pour que le niveau global mesuré soit sensible à l'apparition d'un défaut, il faut que l'énergie vibratoire induite par ce dernier soit significative devant celle induite par le fonctionnement normal de la machine, ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas. Prenant l'exemple d'une moto-soufflante (fig. 8), la valeur de l'indicateur du niveau global en V_{eff} mesuré sur un palier est de 3,24 mm/s. Dans la réalité cette valeur est calculée comme suit : $V_{eff} = \sqrt{3^2 + 0,5^2 + 1^2 + 0,5^2} = 3,24$ mm/s, dont :

- 3 mm/s représente un déséquilibre ;
- 0,5 mm/s représente un désalignement ;
- 1,0 mm/s représente un effort d'engrènement ;
- 0,5 mm/s représente un écaillage affectant la bague interne du roulement du palier turbine.

Alors, si le niveau de déséquilibre augmente par 30% on aura un niveau global ($\sqrt{3,9^2 + 0,5^2 + 1^2 + 0,5^2} = 4,08$) mm/s qui se traduit par une augmentation de 26% de l'ancienne valeur. Par contre l'amplification du défaut de la bague interne du roulement par 3 fois donne un niveau global ($\sqrt{3^2 + 0,5^2 + 1^2 + 1,5^2} = 3,53$ mm/s) ce qui représente seulement une augmentation de 9% de la première mesure. Pourtant, dans ce dernier cas, il faut programmer dans un bref délai le changement du roulement [12].

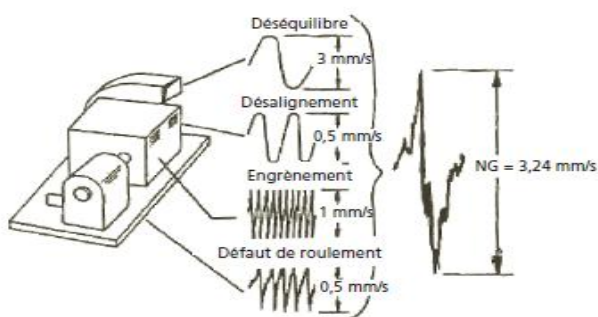


Fig. 8. Les différents signaux de la moto-soufflante

- La classification des machines dans ces normes ne prend en compte que deux critères (la puissance et la fondation) [11], tout en négligeant les critères d'évaluation propres à chaque type de machines

(pompe, ventilateur, engrenage, compresseur, alternateur, turbine...).

- Les critères d'évaluation proposés par les normes tiennent insuffisamment compte des différentes vitesses au niveau d'un équipement. Si on prend l'exemple de la turbosoufflante de la fig. 9, on remarque qu'il y a deux arbres de vitesses largement différentes (fig. 10). Or, puisque la vibration a une relation avec la vitesse de rotation, on aura pratiquement un écart important entre les mesures prises au niveau des points P1 et P2 de l'arbre de la soufflante et P3, P4 et P5 de l'arbre de la turbine.

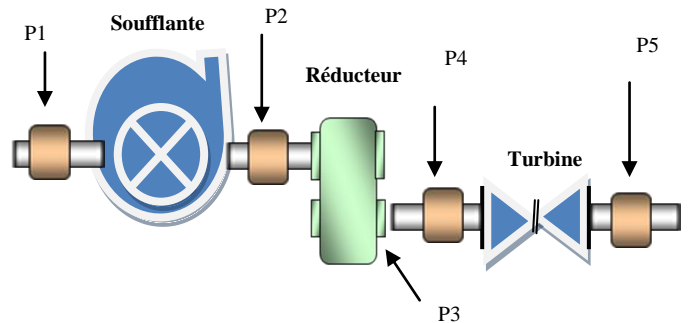


Fig. 9. Schéma cinématique de la turbosoufflante

Turbine	Vitesse nominale	11890 tr/mn
Réducteur	Vitesse d'entrée	11890 tr/mn
	Vitesse de sortie	2670 tr/mn
	Nb de dents d'entrée	64
	Nb de dents de sortie	285
Roue	Vitesse nominale	2670 tr/mn
Palier	à coussinet d'huile	

Fig. 10. Caractéristiques de la turbosoufflante

Le tableau 2 montre bien qu'il y a un écart important entre les valeurs mesurées sur les deux arbres qui tournent successivement par 11890 tr/min et 2670 tr/min. Par exemple, le 23/08/2014, nous avons enregistré sur la direction horizontale de P1 et P2 de la soufflante les deux valeurs 0.5 mm/s et 1.3 mm/s qui sont très différentes des valeurs 4.8 mm/s, 5.4 mm/s et 7.5 mm/s mesurées successivement sur la même direction des P3, P4 et P5.

Tableau II. Tranquillité de marche de la turbosoufflante enregistrée entre 23/08/2014 et 05/11/2014.

Date	Soufflante						Réducteur			Turbine					
	P1		P2		P3			P4		P5					
	H	V	A	H	V	A	H	V	A	H	V	A	H	V	A
23/08/2014	0,5	0,4	1,7	1,3	0,9	1,7	4,8	5,6	3,2	5,4	3,8	2,9	7,5	2,1	2,7
06/09/2014	0,5	0,3	0,6	1,1	0,6	1,4	3,9	4,8	4,4	3,9	4,7	2,4	6,1	1,4	1,6
20/09/2014	0,6	0,5	1,9	0,9	0,8	1,8	3,4	6,5	3,9	6,2	4,7	2,8	5,1	1,1	1,2
23/09/2014	0,5	0,4	1,6	0,8	0,8	1,8	2,9	4,6	3,7	4,1	2,7	1,6	4,7	1,4	2,1
10/10/2014	0,5	0,3	1,3	0,8	0,4	1,3	3,5	4,3	1,9	4,6	2,3	1,8	6,4	1,2	1,7
25/10/2014	0,4	0,4	1,1	1,1	0,8	1,6	5,1	7,6	2,6	4,9	4,4	1,9	8,2	5,6	6,8
05/11/2014	0,4	0,4	1,4	0,8	0,9	1,7	3,5	6,6	3,9	4,3	3,2	4,8	6,9	4,1	4,5

- Ces normes ont été initialement conçues pour fournir des lignes directrices générales pour la conception et le fonctionnement sous certaines conditions des machines tournantes [8]. Cependant, la variation des valeurs de vibrations réelles d'un palier suite au changement de température, de charge et de vitesse ne signifie pas nécessairement la présence d'une dégradation. Pour le broyeur n° 1, l'analyse des tendances des valeurs de vibrations des deux points P4 et P5 pour les années 2011, 2012, 2013 et 2014 montre que la plupart des mesures dépassent le seuil recommandé par la norme ISO 10816 qui est de 11.2 mm/s sans enregistrement de défauts (fig. 11, 12, 13 et 14).

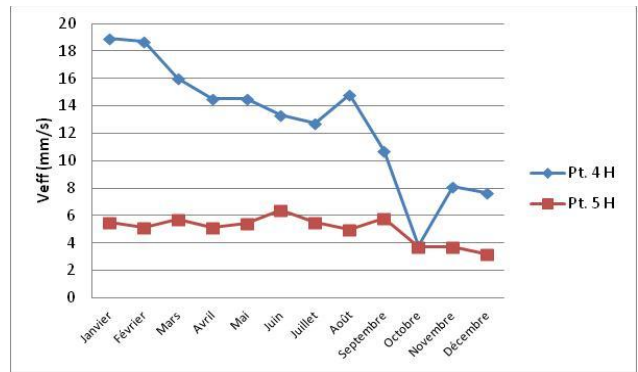


Fig. 13. Tranquillité de la turbosoufflante enregistrée en 2013.

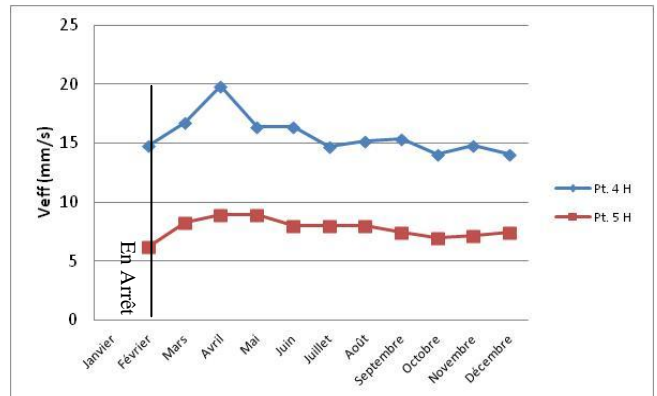


Fig. 14. Tranquillité de la turbosoufflante enregistrée en 2014.

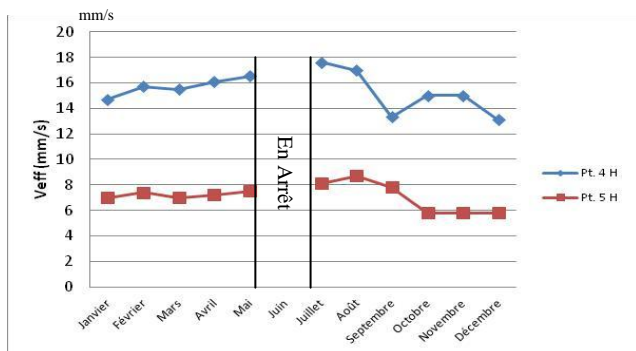


Fig. 11. Tranquillité de la turbosoufflante enregistrée en 2011.

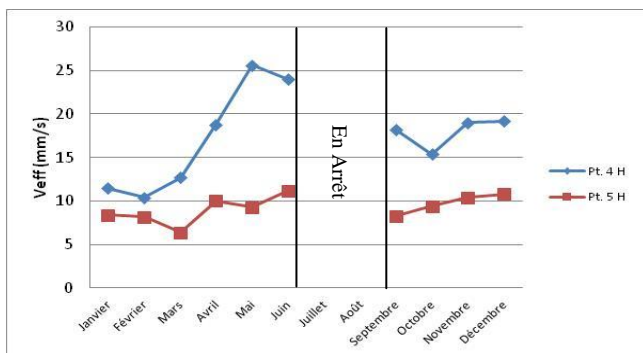


Fig. 12. Tranquillité de la turbosoufflante enregistrée en 2012.

Donc, l'utilisation des normes pour la fixation des seuils de vibrations n'est pas sans danger. Les critères d'évaluation qui ne tiennent pas compte de certaines réalités relatives à la machine et à son environnement, l'absence de liens entre la nature de défaut de vibration et les seuils recommandés par les normes et l'effet de masque limitent la fiabilité de ces normes pour la surveillance et le diagnostic des vibrations. C'est pourquoi les seuils préconisés par les normes peuvent induire à l'erreur et le dépassement d'un seuil peut ne pas être synonyme de défaut. D'où la nécessité de trouver une méthode plus fiable et efficace permettant d'effectuer un diagnostic précis des installations avant leur mise sous surveillance, de définir les seuils et de les ajuster en fonction de l'état réel de chaque machine. Dans ce cadre, s'inscrit alors notre travail qui consiste à proposer une démarche pour évaluer objectivement les seuils de vibration

V. DÉMARCHE POUR DÉTERMINER DES SEUILS DE VIBRATIONS

Devant les difficultés d'utilisation de ces normes de vibration, un ensemble de démarches ont été développées pour la fixation des seuils de référence en s'appuyant sur l'expérience du constructeur ou de l'exploitant, parfois encore en fonction des statistiques ou des historiques de pannes comme celle proposée par Thomas [11] qui utilise l'espérance et l'écart type des mesures pour définir les niveaux relatifs d'alarme. Hélas, ces références s'appliquent généralement à des machines neuves, alors que, très fréquemment, la surveillance vibratoire est mise en place sur un parc machines

en service depuis de longues années et pour lesquelles nous n'avons pas procédé à aucune mesure lors de la mise en service [4]. Le but de notre travail est de proposer une démarche globale s'appliquant à toutes les machines tout en prenant en considération les conditions environnementales et d'installation.

À la différence des démarches proposées, notre démarche commence par l'élaboration d'un diagnostic pointu de la machine pour distinguer, au niveau du spectre vibratoire, entre les signaux mesurés dus aux défauts de vibrations et ceux relatifs aux conditions environnementales et d'installation. Les valeurs de ces derniers seront ajoutées aux seuils prédéfinis par les normes pour donner des niveaux de référence permettant un suivi efficace de l'état réel de la machine.

A. Etapes de la démarche (fig. 15)

Cette démarche consiste à fixer les seuils de référence en se basant sur les différents spectres pris sur chaque point de l'installation. En effet, comme le spectre nous permet d'avoir des informations sur la source de vibrations et le degré de gravité du problème, nous allons l'exploiter pour identifier tous les pics qui sont dus aux conditions environnementales et d'installation et les autres pics qui sont anormaux.

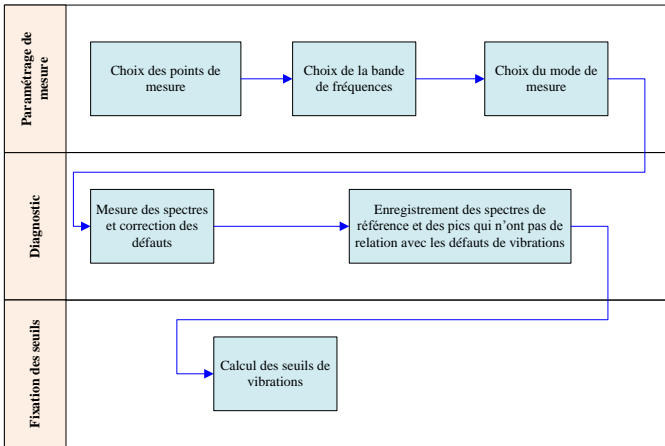


Fig. 15. Démarche proposée pour la fixation des seuils de vibrations pour la surveillance des machines tournantes

Pour identifier efficacement les valeurs de référence en prenant en considération toutes les conditions environnementales et d'installation, nous procédons comme suit :

- 1) On commence par le choix des points de mesure. Ainsi, pour prendre en considération, la puissance et la vitesse de rotation, on doit fixer les seuils par arbre de rotation.
- 2) On choisit une large bande de fréquences. Donc, afin d'intégrer toutes les fréquences possibles, on choisit la bande suivante [10 - 30000 Hz] qui permet de visualiser tous les phénomènes de basse fréquence et de haute fréquence. Si une partie de la plage de fréquences ne contient pas d'harmoniques, la largeur de cette bande peut être réduite.

- 3) Pour le mode de mesure, on choisit la vitesse de rotation qui accentue les pics de la basse fréquence ainsi que la haute fréquence.
- 4) On mesure le spectre de la vibration et on fait un premier diagnostic. Au niveau de ce diagnostic, on commence par l'identification de la source et de la gravité de chaque pic. Donc, selon l'analyse vibratoire, on doit engager des actions correctives si les pics identifiés renseignent sur un problème de vibration (désalignement, desserrage, défaut courroie, déséquilibre, défaut roulement,...).
- 5) Après avoir éliminé tous les pics anormaux, on mesure le spectre de référence et on enregistre les amplitudes des pics qui n'ont pas de relation avec les défauts de vibrations.
- 6) Pour terminer, on calcule les différents seuils en RMS par la formule suivante :

$$S = \sqrt{S_n^2 + A_{hn1}^2 + A_{hn2}^2 + \dots + A_{hmi}^2 + \dots + A_{hnm}^2}$$

avec :

- S_n : Seuil donné par la norme ISO 10816 ;
- A_{hni} : Amplitude du $i^{\text{ème}}$ pic enregistré dans l'étape 5 et qui n'a pas de relation avec les défauts de vibrations ;
- m : le nombre des pics enregistrés à l'étape 5 et qui n'ont pas de relation avec les défauts de vibrations.

B. Etude de cas d'un Broyeur

Dans cette étude nous choisissons le broyeur 1 de la fig. 2, pour fixer les différents seuils de l'analyse vibratoire via l'application de notre démarche.

Nous avons fixé 6 points de mesure comme il est indiqué sur la fig. 2 :

- 3 points sur le 1^{er} arbre de vitesse 985 tr/min
- 3 points sur le 2^{ème} arbre de vitesse 150 tr/min

La mesure vibratoire sera effectuée, en premier lieu, dans la bande de fréquences [10-30000 Hz]. Après, nous allons utiliser l'analyseur et le collecteur de données VibXpert II pour enregistrer les spectres sur les plages de fréquences contenant des pics (fig. 16).

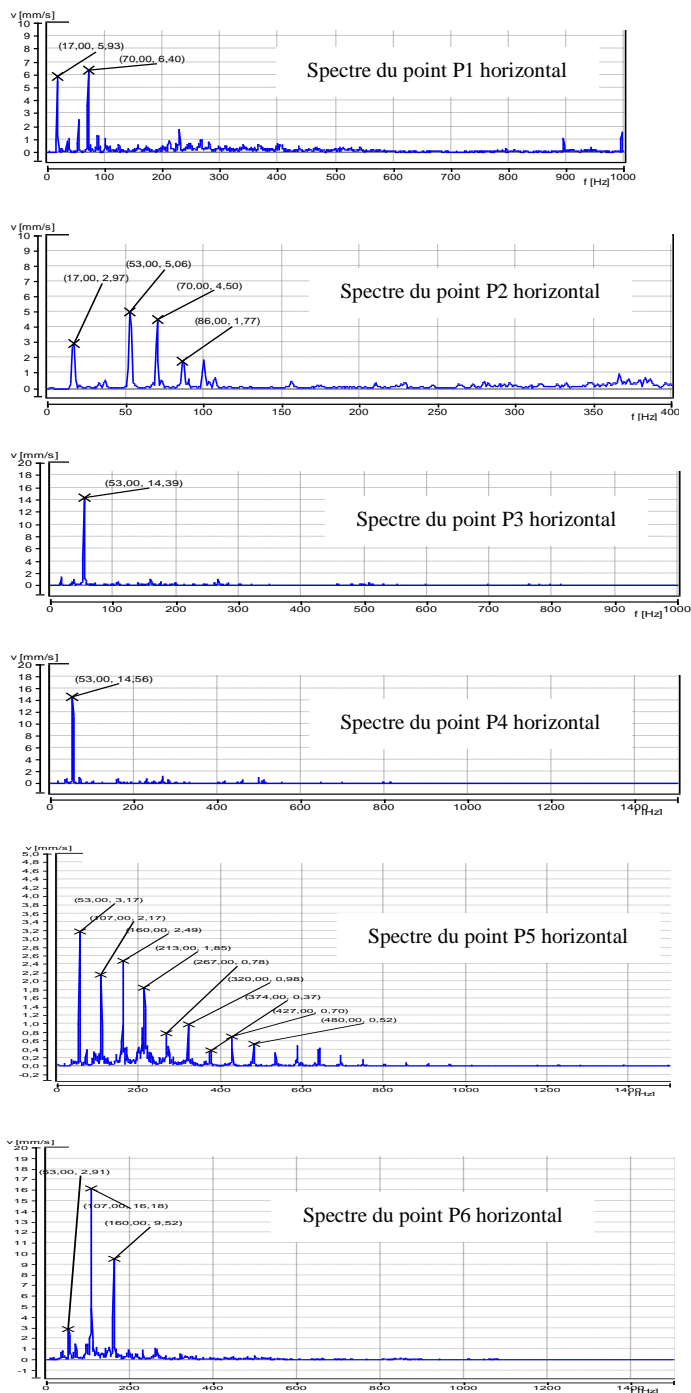


Fig. 16. Les spectres mesurés sur les points du broyeur 1.

D'après les analyses fréquentielles des points P1 et P2, le pic le plus élevé est de 6.40 mm/s à la fréquence de 70Hz. Cette fréquence correspond à 2x 35 Hz qui est celle du pignon d'attaque. Donc on peut déduire qu'il s'agit d'un problème d'alignement de ce dernier. Pour éliminer ce pic, le service mécanique doit procéder à un alignement du pignon d'attaque.

Au niveau des spectres des points P3 et P4, on trouve qu'il y a un pic de 14,5 mm/s à la fréquence 53 Hz. Cette fréquence correspond à la fréquence d'engrènement. Il s'agit d'une fréquence liée au fonctionnement du broyeur. Elle n'a pas de

relation avec un défaut de vibration. Ainsi, il faut prendre en considération l'amplitude de ce pic dans la fixation des seuils.

Les deux spectres des points P5 et P6 présentent des harmoniques de la fréquence 53 Hz. Ce qui renseigne sur un défaut de jeu. Le service mécanique doit procéder à la vérification du jeu au niveau du réducteur.

Après la correction de l'alignement de l'arbre du pignon et du jeu au niveau du réducteur, on fixe les seuils comme suit (tableau III) :

- Pour les points 1 et 2, on garde les mêmes seuils donnés par la norme ISO 10816 ;
- Pour les points 3 et 4, on ajoute 14.5 mm/s aux seuils donnés par la norme ISO 10816. Donc le seul critique 11.2 mm/s donné par la norme en vigueur devient 18.3 mm/s qui est égale à $\sqrt{11.2^2 + 14.5^2}$ selon la formule de l'étape 6.
- Pour les points 5 et 6, on garde les mêmes seuils donnés par la norme ISO 10816.

Tableau III. Nouveaux seuils de suivi vibratoire du broyeur 1

État \ Point	Points 1 et 2	Points 3 et 4	Points 5 et 6
Bon	inférieur à 1.8 mm/s	inférieur à 14.6 mm/s	inférieur à 1.8 mm/s
Admissible	Entre 1.8 et 4.7 mm/s	Entre 14.6 et 15.2 mm/s	Entre 1.8 et 4.7 mm/s
Encore admissible	Entre 4.7 et 11.2 mm/s	Entre 15.2 et 18.3 mm/s	Entre 4.7 et 11 mm/s
Inadmissible	Supérieur à 11.2 mm/s	Supérieur à 18.3 mm/s	Supérieur à 11 mm/s

Après l'analyse des mesures vibratoires aux points 3 et 4, la démarche proposée montre que le broyeur peut fonctionner jusqu'à une valeur de vibration de 18.3 mm/s (voir tableau III). Or la norme fixe comme alarme critique 11.2 mm/s.

Avec cette démarche on a pu combiner entre les seuils fixés par la norme ISO 10816 et notre diagnostic afin de lier les valeurs de référence avec le fonctionnement réel de l'installation.

VI. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons mis le point sur les différentes normes qui sont apparues depuis les 40 dernières années. À travers l'étude de cas réels de machines tournantes (turbosoufflantes, broyeurs, systèmes d'engrenage) nous avons mis l'accent sur leurs limites dans la pratique. Ensuite, nous avons proposé une démarche qui permet de définir les différents seuils de surveillance vibratoire en exploitant les spectres pris sur chaque point de l'installation.

Un cas d'étude industrielle a été traité pour valider la démarche et montrer que dans certains cas le dépassement des seuils imposés par les normes n'est pas toujours synonyme de défaut.

Actuellement, cette démarche est appliquée par la cellule de vibration de l'usine où on a traité les différentes études de cas.

En perspective, cette démarche doit être traduite en programme informatique permettant la fixation automatique des seuils.

Références

- [1] P.Estocq, Une approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire de défauts d'écailage de roulements à billes , PHD Thesis. Reims: University of Reims, 2004.
- [2] D. AUGÉIX. Analyse vibratoire des machines tournantes. Techniques de l'Ingénieur, 2000.
- [3] A. Boulenger. Maintenance conditionnelle. DUNOD, 2008
- [4] A. Boulenger et C. Pachaud, Surveillance des machines par analyse des vibrations, Aide-mémoire, Dunod, Paris, 2009.
- [5] R.F. Bosmans, Detection and Early Diagnosis of Potential Failures of Rotating Machinery. Report L0411-00 (2/82). Bently Nevada Corporation, USA, 1982.
- [6] J.M. Borda, Técnicas de Mantenimiento Avanzado, Ed. Deusto, 1990.
- [7] A. Boulenger et C. Pachaud. "Analyse vibratoire en maintenance - Surveillance et diagnostic des machines", Dunod, 2007.
- [8] J Michael Robichaud, "Reference Standards for Vibration Monitoring and Analysis", Bretech Engineering Ltd., 70 Crown Street, Saint John, NB Canada, 2004
- [9] W.YANG and R.COURT. Experimental study on the optimum time for conducting bearing maintenance. Measurement 46 - 2781–2791, 2013
- [10] J.S. Mitchell. From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance - Seventy Years of Continuous Progress-. SOUND AND VIBRATION/JANUARY 2007.
- [11] M. Thomas, Fiabilité, maintenance prédictive et vibrations des machines, Université du Québec, ÉTS, Montréal, Canada, 2012
- [12] A. Boulenger et C. Pachaud, Surveillance des machines par analyse des vibrations, Aide-mémoire, Dunod, Paris, 2009.
- [13] ISO standard for machine vibration severity, World Pumps, Volume 1999, Issue 388, January 1999, Page 4.
- [14] V.N. Kostyukov and A.P. Naumenko, Standardization in the sphere of vibrodiagnostic monitoring of piston compressors, Procedia Engineering vol. 113, pp. 370 – 380, 2015.