

VIBRATIONS

NIVEAUX DE VIBRATION, ANALYSE VIBRATOIRE ET RECOMMANDATIONS

Les vibrations sont omniprésentes dans les installations de pompage. Les groupes électropompes vibrent en raison des défauts d'équilibrage des rotors, des imperfections des paliers et des défauts de lignage. Les tuyauteries vibrent sous l'effet des écoulements, les moteurs sous l'effet des forces électromagnétiques et les structures vibrent sous l'effet des excitations vibratoires transmises par les équipements.

La responsabilité du Constructeur est de concevoir des machines correctement équilibrées et possédant des vitesses critiques raisonnablement éloignées des vitesses de fonctionnement pour lesquelles elles ont été conçues. A cet égard, on notera que l'utilisation de la vitesse variable c'est très largement répandue, augmentant ainsi le spectre des points de fonctionnement couvert par les machines, et par conséquent le facteur de risque qu'il convient d'anticiper. Un premier point est donc de bien préciser au Constructeur quelle est la plage et les vitesses de fonctionnement prévues in situ dans le cadre d'un projet et de vérifier avec lui si les exigences de niveaux vibratoires prescrites sont compatibles avec le type de machine anticipé.

La responsabilité de l'installateur est de veiller à ce que ces machines soient correctement installées : Il y a des fondamentaux à respecter en termes d'encrages, de lignage et de raccordements aux conduites d'aspirations et de refoulement ; il y en a d'autres concernant leurs conditions d'alimentation des pompes.

La responsabilité du concepteur est aussi de vérifier l'absence de possibles couplages des excitations hydrodynamiques et mécaniques avec les fréquences propres de l'infrastructure avec laquelle le (s) groupe (s) de pompage sont dynamiquement liés.

L'objet de ce document est de rappeler quelles sont les normes en vigueur en matière de niveau vibratoire des groupes électropompes installés, de rappeler quelles sont les bonnes règles et recommandations d'usage quant à la sélection et l'installation de ces machines de manière à satisfaire aux contraintes vibratoires imposées in situ.

Quelles sont les causes d'excitation vibratoire

Comme toute machine tournante, un groupe électropompe génère des vibrations, la problématique étant de limiter ces vibrations à des valeurs acceptables afin de garantir l'intégrité mécanique de cette machine en exploitation et dans le temps (rupture par fatigue, fissure, usure prématurée, débit de fuite excessif des garnitures, etc..). Sur site la situation se complique car le niveau vibratoire d'une machine est aussi lié à ses conditions d'installation, d'exploitation et aux sollicitations diverses car les sources de vibration sont multiples et procèdent bien souvent d'un niveau d'expertise avisé.

Nous distinguerons successivement:

- **Les défauts de construction et d'équilibrage**, comme le niveau du balourd résiduel du rotor, les défauts d'assemblage mécanique et de lignage, les imperfections et les dommages sur les paliers, les frottements internes la dilatation des composants.
- **Les défauts / faiblesses d'installation**: La conception / rigidité du support, masse insuffisante des massifs/fondations, la qualité des encrages et de raccordement aux tuyauteries d'aspiration / refoulement, le mode de supportage de ces tuyauteries.
- **Les perturbations hydrauliques** qui génèrent, par nature, des forces hydrodynamiques susceptibles d'exciter le niveau vibratoire de la pompe et du système de tuyauteries. Ces perturbations ont généralement pour origine:



- Des phénomènes de recirculation/ d'instabilité hydraulique, de décollement de veines fluides, à débits partiels en haut de courbe Q/H de la pompe, mais aussi à forts débits, en bas de courbe; d'une façon très générale, ces perturbations apparaissent dès que l'on s'éloigne de la zone de meilleur rendement (BEP) de la pompe.
- Le fonctionnement en régime de cavitation de la pompe.
- Un déséquilibre hydraulique à l'entrée de la pompe, lié à un "mauvais" profil de la conduite à l'aspiration et / ou la présence d'obstacles dans l'écoulement.
- Des instabilités hydrauliques à l'entrée de la pompe, liées au développement de vortex de surface et/ou immergés de parois ou de radier.
- La présence d'air / de bulles d'air dans l'effluent, un classique étant une chute d'eau dans la bache de pompage, proche de l'aspiration des pompes installées.
- L'instabilité des écoulements dans les conduites d'aspiration et / ou de refoulement ; les régimes de cavitation dans les appareils hydrauliques.
- Le colmatage partiel d'une hydraulique en eaux chargées (déséquilibre et turbulences).
- **Les excitations liées au type et mode d'entraînement**, comme la présence d'un moteur thermique par exemple, un réducteur à engrenages ou les perturbations liées à l'utilisation d'un variateur de fréquence.
- **Les phénomènes de résonance / fonctionnement à une vitesse critique**, dès que les fréquences d'excitations dynamiques voisinent l'une des fréquences propres de l'installation de pompage (GC, structure, groupes électropompes et système de tuyauteries ...).

Équilibrage et fréquences d'excitation vibratoire spécifiques aux pompes.

La qualité d'équilibrage du rotor (complet) d'un groupe électropompe est un facteur déterminant. La norme **ISO 1940-1 : 2003**, précise les exigences en matière de qualité dans l'équilibrage pour les rotors en état rigide.

Pour les applications courantes, il est inutile et souvent onéreux de pousser trop loin la précision d'un équilibrage. La limite peut être prescrite par le constructeur. Concernant les pompes et groupes électropompes de production de série et sauf spécifications contraires, le degré de qualité ou classe d'équilibrage du rotor est fixée à: G 6.3, valeur généralement admises pour la prescription. Pour les plus grandes machines, en particulier celles de type "custom" et de fonctionnement de longue durée, le niveau requis est souvent G2.5. En pompage d'eaux usées, la problématique est très différente.

Notons que la classe d'équilibrage impose une valeur constante au produit du balourd spécifique résiduel admissible (e_{per}) par la vitesse angulaire nominale du mobile ($\omega = \pi N/30$),

$$\text{soit dans le cas G 6.3, } (e_{per} \cdot \omega) = \text{Cst} = 6.3 \text{ mm/s}$$

Le balourd résiduel est un balourd de tout type, subsistant après l'équilibrage du rotor; il génère une force radiale tournante déterminée par le niveau d'équilibrage du rotor, proportionnelle au carré de la vitesse de rotation et de la masse du rotor (m).

Ce balourd doit rester inférieur au balourd résiduel admissible (U_{per}) exprimé en ($mm.g$) fixé par la classe d'équilibrage (G) souhaité du rotor et définit par,

$$U_{per} = 10^3 (e_{per} \cdot m) / \omega$$

Les fréquences d'excitation vibratoire générées par le fonctionnement de la pompe sont multiples ; nous les classerons ici par ordre croissant.



- Le premier niveau est associé à la vitesse (N) ou la plage des vitesses de rotation de la pompe si celle-ci est pilotée à vitesse variable. Sont concernés le balourd et les forces hydrauliques variables générées par la géométrie de la volute et de la roue dans le cas d'une hydraulique de type monocanal. Les fréquences correspondantes, qui sont la fréquence principale f_r et ses harmoniques de rang n , définie par la relation:

$$f_r \text{ (Hz)} = N \text{ (tr/mn)} / 60$$

- Le 2^{ème} niveau est un multiple de la vitesse de rotation de la pompe. Il concerne les forces hydrauliques liées au passage des aubes de la roue (blade passing frequency) face au bec de sortie de la volute et face aux directrices du diffuseur de sortie, pour certaines conceptions de pompes. Soit z_1 le nombre d'aubes de la roue et z_2 le nombre d'ailettes du diffuseur, les fréquences susceptibles alors d'apparaître, seront

$$f_{bpf} = n \cdot z_1 \cdot f_r$$

$$f_{bpf} = n \cdot z_2 \cdot f_r$$

$$f_{bpf} = n \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot f_r$$

Normes et limites de vibrations admissibles

Un premier point est de rappeler que les niveaux de vibrations enregistrés en plateforme usine chez le Constructeur ou toutes autres plateformes certifiées, lors des essais de performances hydrauliques de la machine par exemple, ne sont représentatifs que des conditions d'essais spécifiques au banc d'essais (rigidité du montage de la pompe, raccordement à la boucle d'essais, etc...) . Les valeurs enregistrées dans ces conditions sont alors données à titre indicatif; les valeurs mesurées, sur site, en conditions définitives d'exploitation de la machine, seront quant à elles " contractuelles ".

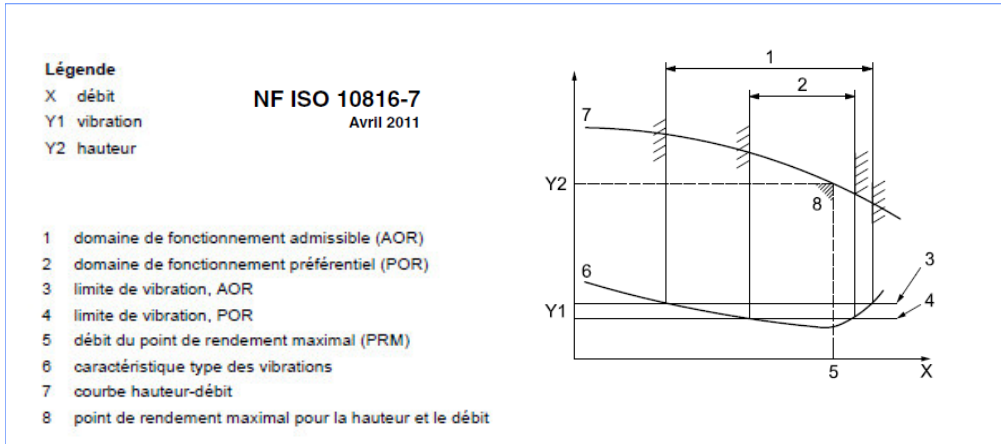
La grandeur principale d'évaluation est la valeur efficace de vitesse de vibration v_{eff} aussi notée v_{RMS} ; dans la grande majorité des cas, cette mesure est suffisante. L'usage est cependant de donner les valeurs limites de zones de vibrations en termes vitesse efficace et de déplacement ($S \mu\text{m}$).

Concernant les valeurs admissibles et pour les installations de pompage courantes, on se référera à la norme la plus récente, en l'occurrence l' **ISO 10816 partie 7** - Pompes Rotodynamiques pour applications industrielles, y compris mesurage sur les arbres tournants. Rappelons que cette norme identifie deux catégories de pompe (I et II) et définit quatre zones d'évaluation (A ,B,C et D). Les limites s'appliquent aux valeurs efficaces relatives à la vitesse et au déplacement des vibrations dans la gamme de fréquence de 10 Hz à 1000 Hz pour la majorité des machines ou de 2 Hz à 1000 Hz pour celles fonctionnant à des vitesses de rotation $< 600 \text{ tr.mn}^{-1}$.

Pour plus de détails, se reporter à la norme mais notons que les valeurs proposées ne sont qu'indicatives, issues de l'expérience et recueillies dans le cadre d'une étude portant sur 1500 pompes installées; elles nécessitent, pour être contractuelles, de l'accord entre les parties concernées.

Ces niveaux de vibrations sont en outre établis pour des conditions de régime permanent, aux vitesses et charges nominales, proches du point de meilleur rendement de la machine, ce qui exclut les points de fonctionnement en "haut et bas de courbe" et les régimes transitoires comme par exemple, en phase de démarrage du groupe électropompe. Dernier point et non de moindres, Ces niveaux de vibration se réfèrent à des pompes de type centrifuge, classiques, multicanaux, pour "eau claire". En application eau usées et plus particulièrement pour les roues de type monocanal dites à forte section de passage, la norme est pour le moins absente. Notons qu'elle exclue notamment " les pompes à solides, pompes à boues et pompes immergées ". Imaginons alors le cas d'une installation de pompage en eaux usées équipée de groupes électropompes submersibles immergés, à roue de type monocanal.....

Pour synthèse retenons le schéma ci-après, extrait de la norme ISO 10816, qui illustre les différents domaines de fonctionnement visés.



- Synthèse des niveaux de vibrations admissibles, conformément aux exigences de la norme NF ISO 10816-7

DIN ISO 10816-7	Category 1		Category 2			
Pump type	Rotodynamic pumps with high reliability, availability or security requirements.		Rotodynamic pumps for general or less critical applications.		r < 600 rpr	
Power	< 200 kW	> 200 kW	< 200 kW	> 200 kW	0.5 rpm 1.0 rpm 2.0 rpm	
Velocity v_{eff}	7,6	6,5	9,5	8,5	Displacement S_{pp}	
	5,0	4,0	6,1	5,1		
10-1000 Hz $r > 600$ rpm						130
2-1000 Hz $r < 600$ rpm						80
	2,5		3,2			50
mm/s rms			mm/s rms			µm
	A		A		A	

A Newly commissioned machines
 B Unrestricted long term operation
 C Restricted long term operation
 D Vibration causing damage

Mesurage des vibrations et Analyse vibratoire

Les mesurages sont effectués dans un, deux ou trois directions selon accord entre les parties et généralement au niveau des paliers. La mesure axiale peut être unique mais dans ce cas elle doit être effectuée au palier de butée. Une mesure globale plan est généralement suffisante ; l'essentiel est de réaliser ces mesurages sur les parties exposées et accessibles.

Le capteur de vibration le plus couramment utilisé est l'accéléromètre piezoélectrique. L'appareillage le plus simple mesure uniquement la valeur moyenne brute de l'accélération, sans spectre vibratoire, ce ne permet de constater que la pompe "vibre" ou non exagérément par rapport à une valeur fixée par le Constructeur, mais il en aucun cas ne permet d'en indiquer la cause. Les bases de cette analyse sont des mesures spectrales qui permettent l'analyse des vibrations non seulement en valeur, mais aussi en fréquence.

L'objectif de l'étude vibratoire d'une structure ou d'une machine est de vérifier l'absence de phénomènes d'excitation à l'une de ses fréquences propres ou naturelles (mise en résonance). Cette étude de conception dynamique se réalise généralement par modélisation mathématique simplifiée ou par éléments finis pour les structures complexes, et conduit notamment à l'élaboration de diagrammes de "Stabilité", dits diagrammes de Campbell, qui superposent l'évolution des fréquences naturelles et de l'excitation du système. Les intersections entre ces deux séries de courbes sont associées à des vitesses de rotations particulières qui peuvent donner lieu à résonance et qui sont alors

systématiquement éliminées de la plage de fonctionnement autorisée des machines. Le critère de stabilité est satisfait si l'analyse ne démontre pas de couplage des excitations hydrodynamiques et mécaniques produites par les pompes avec les fréquences nodales structurelles calculées ou enregistrées in situ.

Sur une installation existante, la réponse vibratoire d'un système de pompage, peut être obtenue à partir d'une analyse modale par impact au marteau de choc, permettant de mettre en évidence les fréquences possibles de mise en résonance.

Mesures et analyses vibratoires sont aussi souvent conduites sur site, au titre de la maintenance conditionnelle ou prédictive d'une machine installée: L'objectif est alors de détecter en exploitation, toute déviance notable par rapport à une signature vibratoire nominale de la machine. Il existe sur le marché de très nombreux logiciels permettant ainsi de réaliser le diagnostic en live de l'état vibratoire d'une machine, de relayer des seuils vibratoires d'alarmes prédéfinis, de détecter l'origine des défauts pour y apporter des remèdes.

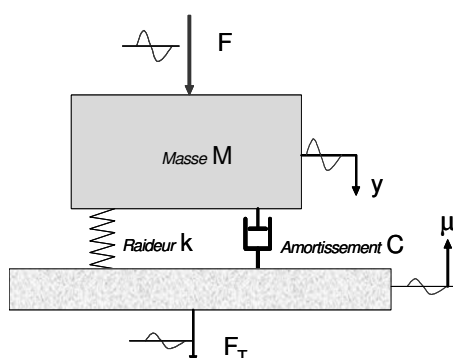
Isolation vibratoire

Les pompes et groupes électropompes sont conçus, fabriqués et testés en usine de manière à satisfaire aux exigences vibratoires couramment admises, voire les plus strictes, sur spécifications particulières. Sur site, si les bonnes règles d'installation sont respectées, les niveaux de vibrations enregistrés sont généralement acceptables. Dans la négative, il est alors nécessaire de procéder à une isolation vibratoire des équipements. En termes de techniques d'isolation vibratoire, trois composantes influencent le comportement dynamique d'une machine:

- le mécanisme générateur de vibrations
- les caractéristiques de la suspension ou les éléments isolants
- la structure ou fondations sur laquelle est posée la machine

L'action prioritaire est évidemment de chercher à réduire les vibrations à la source, c'est-à-dire d'agir sur le mécanisme générateur de vibrations (par une meilleure qualité d'équilibrage dynamique du rotor, déplacement des points de fonctionnement de la pompe vers sa zone de BEP, etc...). Agir à la source, c'est aussi d'assurer un supportage correct des tuyauteries, d'en optimiser le tracé hydraulique, de limiter les vitesses d'écoulement et si nécessaire de réaliser des liaisons souples au raccordement avec les groupes électropompes.

Le but de la suspension est de diminuer, autant que possible, la transmission des efforts d'excitation aux fondations de la machine. Dans le cas le plus simple mais pour autant didactique, celui d'un mouvement à un seul degré de liberté (translation verticale) représenté ci-dessous par une masse M, excitée par une force F et posée sur un support élastique de raideur k avec amortisseur solide ou visqueux C,



La fréquence propre f_0 de ce système; obtenue pour un amortissement nul $C \sim 0$ est donnée par la relation,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

En général la fréquence excitatrice étant connue, on rendra la fréquence propre du système sur suspension f_0 aussi petite que possible; Il faut alors agir soit par **diminution de la raideur (k) de la suspension**, soit par **augmentation de la masse (M) suspendue** (masse de l'équipement et de son socle éventuel) ou plus généralement les deux.

Remarque 1 - Beaucoup de systèmes de pompage sont pilotés à vitesse variable, ce qui provoque des excitations à fréquences variables; L'isolation vibratoire doit alors être réalisée en prenant en compte la fréquence d'excitation la plus basse. Les fréquences supérieures seront automatiquement atténuées. Dans certains cas, il peut être nécessaire d'éviter certaines zones de vitesses de rotation.

Remarque 2- Une machine "suspendue" pour fonctionner dans ces conditions nominales passe souvent par la résonance de cette suspension lors des régimes transitoires de démarrage et d'arrêt. Il faut donc que ce "passage" soit le plus bref possible et que l'amortissement soit suffisamment élevé afin de diminuer les risques.

Recommandations

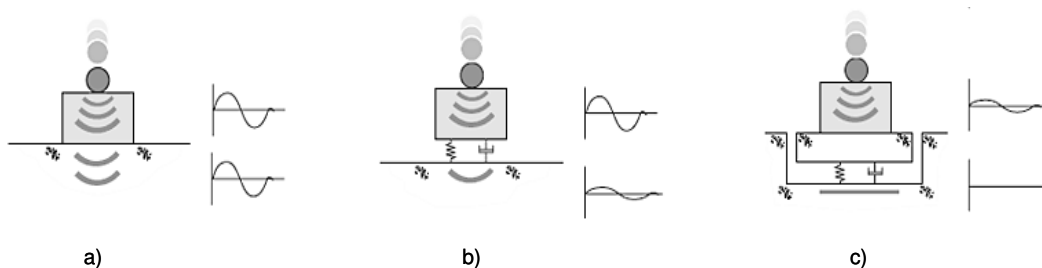
Avant de s'engager, la première recommandation est de bien lire les exigences du cahier des charges en termes de niveaux de vibrations admissibles in situ car ils ne sont pas toujours compatibles avec le type de machine et d'installation proposés ou tout simplement parce que leur application peut entraîner des surcoûts importants d'études, de mise en œuvre et de contrôle sur site. A cet égard, la prescription doit être claire.

La deuxième point est de s'assurer que les fondamentaux en termes de dimensionnement, de sélection et d'installation des groupes électropompes soient bien respectés. Rappelons que le niveau de 'sensibilité vibratoire' est très inégal d'un type machine à l'autre: Il apparaît évident qu'un groupe électropompe de construction monobloc, compact, offre plus d'assurance qu'une pompe de type colonne à ligne d'arbre de conception pendulaire. De même, on comprendra qu'une hydraulique à double ouïe à l'aspiration soit très sensible aux conditions d'alimentation, etc..... Concernant la pompe, l'homme de l'art est réputé être le Constructeur, il lui appartient de donner ses recommandations, de délimiter clairement la zone de fonctionnement Q/H de la pompe, d'en indiquer les modes propres si il y a lieu et d'approuver ou non les plans d'installation projetés par le concepteur.

Dans tous les cas, s'assurer que :

- Les groupes électropompes fonctionnent dans une zone (Q/H) proche de leur meilleur rendement et si que tel ne peut être le cas en permanence, que cette zone ne soit pas une zone d'instabilités, clairement identifiée sur la courbe de performances de la machine, produite par le constructeur. Rappelons au passage, qu'un point de fonctionnement est l'intersection d'une courbe Q/H d'une ou plusieurs pompes associées (// où série) avec une courbe dite de réseau. Cela suppose aussi une bonne maîtrise des données et caractéristiques hydrauliques de ce réseau et des différents niveaux d'exploitation.
- Les critères de $NPSH_{requis}$ de la machine / $NPSH_{disponibles}$ de l'installation, sont bien respectés, avec une réserve suffisante, quels que soient les points de fonctionnement anticipés.
- Les machines répondent aux critères d'équilibrage dynamique des rotors et que leur montage en usine où sur site a été fait suivant les "règles de l'art"
- Les conditions hydrauliques de la pompe à l'aspiration sont en tous points satisfaisantes (stabilité et bonne distribution des écoulements, prérotation limitée, pas d'entraînement d'air, pas de vortex cohérents de surface et encore moins d'immérgés, etc...).
- L'adéquation fréquences propres des structures et des machines / fréquences d'excitation du système est bien compatible.

Par suite, selon le niveau d'exigences requis par le cahier des charges et les réponses vibratoires données par les équipements installés, on retrouve trois cas de figure que l'on peut schématiser ainsi :



Le premier cas (a) est le plus courant : le niveau de vibration généré par la machine, testé en usine, reste dans les valeurs admissibles. Sur site, les recommandations d'usage sont les suivantes:

- S'agissant d'une pompe à moteur séparé, la première étape est de s'assurer du parfait lignage des rotors si il y a lieu ; Ceci étant réalisé, les différents composants du groupe doivent être suffisamment rigides et fermement ancrés aux fondations ou au châssis support, lui-même rigides et fermement ancré aux fondations de telle sorte que les premières sources d'excitations aient leurs fréquences inférieures à la fréquence naturelle la plus basse du système. La bonne pratique veut aussi que l'on intercale au refoulement de la pompe, un manchon compensateur (idem à l'aspiration, si il s'agit d'une installation en fosse sèche).
- Concernant le type de fixation; rappelons que les tiges / crosses d'ancrage liées aux armatures du massif support et scellées au béton lent, offrent les meilleures performances.
- Les chevilles mécaniques ou chimiques peuvent aussi être utilisées mais prendre grand soin de suivre les règles de dimensionnement et les recommandations d'installation fixées par les fabricants.
- Les écrous et freins d'écrous doivent être serrés à la clef dynamométrique conformément aux spécifications des fabricants.
- Rappelons que les brides d'aspiration et de refoulement de la pompe, ne sont normalement pas destinées à reprendre les efforts transmis par les tuyauteries et accessoires de tuyauteries.

Si la pompe ou le groupe électropompe doivent être "isolés" de la structure, cas (b), les bonnes règles d'isolation vibratoire sont alors les suivantes:

- Rigidifier et augmenter suffisamment la masse du châssis ou du massif support, (au moins 2 fois la masse du rotor du groupe électropompe).
- Ancrer solidement le groupe électropompe à ce châssis / massif support.
- Interposer une suspension adaptée (cônes de suspension, plots à coussins métalliques, plaques antivibratoires, etc ..) entre le châssis / massif support et les fondations. Pour toute sélection, consulter les constructeurs et engineering spécialisés: c'est un métier !
- Monter des manchons compensateurs à l'aspiration et au refoulement de la pompe.
- Ancrer fermement les divers éléments de tuyauteries aux fondations ou tout autre structure solide, par des supports rigides, judicieusement positionnés (voir chapitre suivant) et intercaler des manchons compensateurs, si nécessaire.

Le dernier cas (c), mettant en œuvre un massif d'inertie suspendu sur des isolateurs de vibrations ou une plateforme dite flottante, est une solution extrême et coûteuse, à réserver à des applications très particulières (basses fréquences $\ll 10$ hz), des installations de pompage dans des lieux sensibles, notamment intégrées dans des bâtiments publics.

Le dimensionnement de ce type d'isolation vibratoire est un métier ; les mesures et l'analyse vibratoire sur site aussi : Ils doivent être confiées, ou du moins validées par des spécialistes.

Quelques documents et Normes de référence

[1] - Norme **ISO 1940-1** (Aout 2003) - Vibrations mécaniques – Exigences en matière de qualité pour les rotors en état rigide (Constant).

Partie 1 : Spécifications et vérification des tolérances d'équilibrage.

[2] - Norme **NF EN ISO 10816- 1 et 7** (Avril 2011) – Vibrations mécaniques – Evaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes.

Partie 1 : Lignes directrices générales

Partie 7 : Pompes rotodynamiques pour applications industrielles, y compris les mesurages sur les arbres tournants.

[3] – Norme **NF EN 1299 +A1** (Janv.2009) – Vibrations et chocs mécaniques – Isolation vibratoire des machines – Informations pour la mise en œuvre de l'isolation des sources.

[3] - Rapport technique **FD CEN TR 13932** (Janvier 2009) – Pompes rotodynamiques – Recommandations pour les raccordements des tuyauteries d'aspiration et de refoulement.

[4] – Norme **ISO 2954** : Avril 2012 - vibrations mécaniques des machines tournantes et alternatives – Exigences relatives aux appareils de mesure de l'intensité vibratoire.