

# Etat des lieux et Etude de faisabilité : deux phases nécessaires pour la mise en place de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire : Etude de cas

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**— L'analyse vibratoire est une technique de la maintenance conditionnelle particulièrement adaptée aux machines tournantes. Son objectif est la surveillance et le diagnostic de l'état de fonctionnement de ces machines. En revanche, la mise en place d'une telle forme de maintenance reste très difficile. Pour cette raison, nous avons élaboré une démarche de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire (MCAV) qui se décline en 5 phases : état des lieux, étude de faisabilité, phase préparatoire, phase de mise en place et phase d'évaluation et d'amélioration. Dans ce papier, nous présentons en détail les différentes étapes de la démarche proposée. Puis, l'accent sera mis sur les deux premières étapes à savoir l'état des lieux et l'étude de faisabilité où chaque étape sera traduite en un processus d'exécution bien détaillé à travers un cas d'étude industriel.

**Keywords**— *maintenance conditionnelle, analyse vibratoire, Organisation de la maintenance, implantation de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire.*

## I. INTRODUCTION

Face au challenge actuel de l'augmentation de production et de la réduction des coûts, les professionnels de la maintenance se tourment de plus en plus, pour rester compétitifs, vers la maintenance dite conditionnelle [1,2]. En effet, plusieurs travaux ont montré l'importance de cette forme de maintenance pour l'amélioration de la productivité [3,4,5,6]. Pourtant, cette forme de maintenance n'est pas très utilisée [7]. Bengtsson [8] affirme que la maintenance conditionnelle ne présente que 10% de toutes les activités de la maintenance.

La plupart des travaux de recherche dans le domaine portent sur le développement des outils de surveillance et de diagnostic. Par contre, les travaux qui traitent l'aspect managérial notamment la mise en œuvre de la MCAV se font rares [9]. En outre, la plupart des programmes et politiques de maintenance conditionnelle échouent suite au manque des outils managériaux [8].

Moya [10] a constaté qu'il n'y a pas de norme internationale sur la mise en œuvre et la gestion d'un programme de maintenance prédictive. Alors que Mitchell & Murry [11], ont

présenté des suggestions pour l'implantation d'un processus de maintenance conditionnelle. Mobley [12] présente comment un programme de maintenance prédictive peut être établi. Pour, Trodd [13], il a donné quelques conseils pratiques de mise en œuvre de la maintenance prédictive, axés sur les domaines clés permettant l'atteinte des objectifs fixés par l'entreprise. Quant à Bengtsson [8], il a proposé une démarche d'implantation de la maintenance conditionnelle en quatre phases successives, l'étude de faisabilité, la phase d'analyse, la phase de mise en place et la phase d'évaluation. Cette démarche met l'accent sur un ensemble de facteurs clés de la réussite lors du processus d'implantation tels que le soutien managérial, la formation du personnel, la bonne communication entre les différentes parties prenantes et la motivation. Toutefois, la démarche proposée ne présente pas les procédures de déploiement dans une entreprise industrielle, en plus elle ne prend pas en considération les spécificités des techniques utilisées dans la maintenance conditionnelle (Analyse vibratoire, analyse d'huile, thermographie,...). En effet, la complexité de l'analyse vibratoire rend sa mise en place difficile par rapport au suivi des paramètres de marche des processus industriels en tant qu'outil de surveillance [14].

L'analyse vibratoire, en tant qu'outil puissant de la maintenance conditionnelle, est difficile à maîtriser et à mettre en œuvre. Elle s'est, aujourd'hui, très fortement répandue dans l'industrie en y trouvant sa place parmi les stratégies de la maintenance conditionnelle [15, 16, 17, 18]. Pourtant les méthodes et les techniques utilisées sont très difficiles et très différentes d'un site à l'autre. Même les spécialistes trouvent toujours des difficultés lors du déploiement de la MCAV [14]. Actuellement, il existe un réel décalage entre les potentialités d'investigation et de surveillance offertes par l'analyse vibratoire et la plupart des pratiques sur le terrain. La réussite de l'instauration de ces techniques d'investigation passe par l'implantation d'une démarche rigoureuse [19]. Or, Malgré le développement d'un ensemble de démarches, beaucoup de programmes de la MCAV mis en application, donnent des résultats jugés insuffisants et en dessous des espérances.

En outre, Beaucoup de programmes de mise en œuvre proposés par les chercheurs portent sur des installations

spécifiques et se focalisent généralement sur le volet technique [20], ils ne présentent donc pas un caractère générique permettant leur extension à tous les secteurs industriels utilisant des machines tournantes. En effet, la proposition d'une démarche sans procédures décrivant d'une façon pratique les règles de fonctionnement à appliquer et organisant les rôles des différents acteurs laisse une ambiguïté chez les décideurs de maintenance et condamne sa mise en œuvre à l'échec.

Devant l'insuffisance des démarches de mise en œuvre de la MCAV, Courrech et Eshleman [21] ont proposé un programme de mise en place de la MCAV en huit étapes successives focalisées sur l'aspect technique. Cependant, ce programme néglige l'aspect managérial qui définit les actions de pilotage par les responsables ainsi que l'engagement de la direction pour la réussite d'une telle maintenance. Boulenger et Pachaud [14] ont proposé une démarche permettant la mise en œuvre de la MCAV en quatre phases : l'étude de faisabilité, les choix techniques, le démarrage du programme et la pratique de surveillance globale. Mais cette démarche néglige la faisabilité organisationnelle et ne met pas l'accent sur l'étude de l'état des lieux préalablement à l'étude de faisabilité. Les deux démarches, citées ci-dessus, ne fournissent pas des procédures détaillées sur le déroulement de la mise en place. En outre, elles ne sont pas testées et validées dans des cas pratiques.

Dans cet esprit, nous avons élaboré une démarche globale de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire [22] en prenant en considération les clés de la réussite et évitant les causes d'échec. Pour ce faire, nous avons d'abord réalisé trois études complémentaires [23]: un état d'art sur la question; une enquête auprès d'experts nationaux et internationaux dans le domaine de la MCAV et enfin une analyse de 30 ans de pratique de la MCAV au sein d'une grande entreprise marocaine dans le domaine de la transformation chimique, via une démarche collective appelée DCA (Diagnostic Court Autonome). La synthèse de ces études nous a mené à proposer une démarche globale et structurée de la mise en œuvre de la MCAV qui se décline en 5 phases : état des lieux, étude de faisabilité, phase préparatoire, phase de mise en place et phase d'évaluation et d'amélioration.

Dans le souci d'élaborer une démarche qui peut accompagner les industriels dans leur projet de mise en place de la MCAV, nous avons commencé l'implantation, l'élaboration des procédures et la validation de cette démarche au sein de la société dans laquelle nous avons mené notre première étude. Dans ce papier, nous présentons en détail les différentes étapes de la démarche proposée. Puis, l'accent sera mis sur les deux premières étapes à savoir l'état des lieux et l'étude de faisabilité où chaque étape sera traduite en un processus d'exécution bien détaillé à travers un cas d'étude industriel.

## II. DEMARCHE DE MISE EN ŒUVRE DE LA MCAV :

Pour faire face aux difficultés d'implantation de la MCAV, organiser les moyens techniques, logistiques et humains et associer les responsables de la maintenance à tous les stades de mise en place d'une telle politique par un engagement permanent et un pilotage efficace fondé sur des indicateurs économiques, nous avons développé une démarche de la mise en œuvre de la MCAV articulée en cinq phases complémentaires (fig. 1).

### A. Phase 1 : Etat des lieux

La première phase consiste à dresser un état des lieux de l'existant visant à collecter des données sur l'historique, la classification et la performance de nos machines et à établir un bilan des compétences du personnel de maintenance.

Le résultat de cette phase permet de donner à la direction des informations objectives sur l'état des lieux de l'existant et permettra par la suite d'assurer un suivi régulier de la performance du parc machine et du développement des compétences du personnel.

### B. Phase 2 : Etude de la faisabilité

Il s'agit dans cette phase de vérifier la faisabilité du projet de mise en œuvre de la MCAV sur le plan technique, organisationnel et financier.

- Faisabilité technique : Pour cela il est indispensable de définir le pourcentage des machines concernées par l'analyse vibratoire, connaître les vitesses de rotation et évaluer les risques et les difficultés d'accès aux points de mesure.
- Faisabilité Organisationnelle : Avant de lancer le projet de mise en œuvre, il faut d'abord évaluer la maturité de l'organisation de la fonction maintenance au sein de l'entreprise. L'audit reste un outil puissant pour faire cette évaluation [24].
- Faisabilité Financière : Il faut estimer le coût de la surveillance et le coût de non surveillance afin d'évaluer la rentabilité du programme MCAV.

### C. Phase 3 : Phase préparatoire :

A l'issue de l'étude de faisabilité, la direction doit lancer le projet en mettant en place l'organisation technique, humaine et financière et en établissant un calendrier de mise en place. Les grandes orientations seront arrêtées dans cette phase et peuvent se résumer aux points suivants :

- Définition des rôles et responsabilités de tous les acteurs pour chaque étape du projet ;
- Choix du type de prestation (internalisation, la sous-traitance totale ou partielle de la surveillance et du diagnostic) ;
- Sélection des équipements critiques à surveiller selon la classification multicritère établie à la première phase.
- Choix des paramètres de surveillance (les indicateurs de surveillance, l'emplacement des capteurs, l'intervalle de mesure et le paramétrage du logiciel) ;
- Choix du matériel et mode de surveillance ;
- Ingénierie de formation.

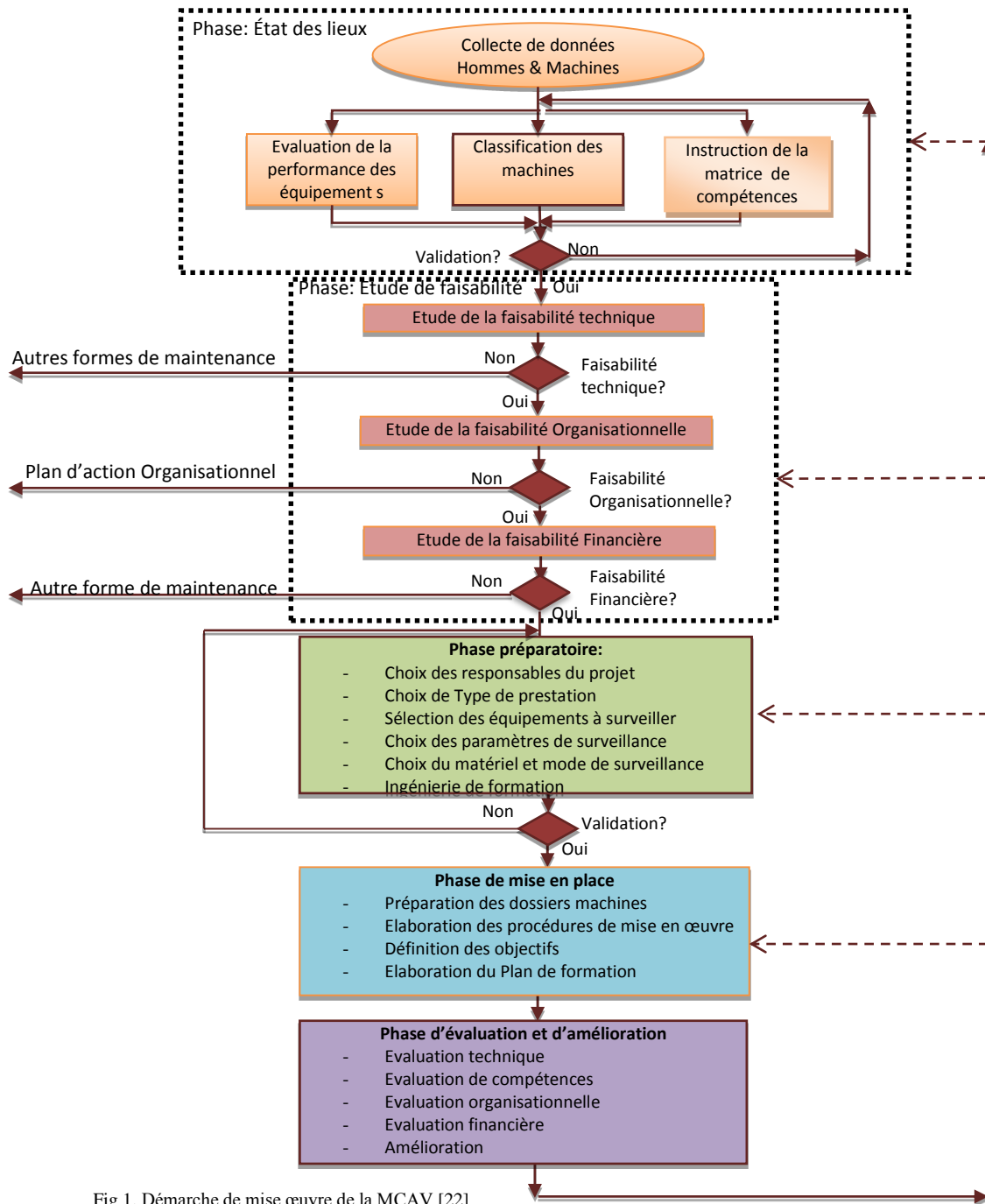


Fig 1. Démarche de mise œuvre de la MCAV [22]

*Phase 4 : Phase de mise en place*

Après la préparation, la phase de mise en place se poursuit par :

- La création des dossiers machines qui sont indispensables pour assurer un bon suivi de vibration.
- La mise en place des procédures qui sont indispensables pour :
  - Gérer des compétences des acteurs de MCAV,
  - Planifier, mesurer, diagnostiquer et analyser les défauts de vibrations,

- Assurer un suivi de l'accompagnement et de la sous-traitance,
- Mettre à jour les dossiers machines,
- Mesurer et suivre les différents indicateurs.
- La mise en place des indicateurs de performance pour quantifier la réussite du programme et justifier les différents investissements.
- La définition d'un plan de formation continue pour le développement des compétences des acteurs du projet.

- Analyse des pannes : tout dépassement d'un seuil de vibration doit être suivi d'un diagnostic approfondi afin d'identifier la gravité du défaut et les causes racines de ce dépassement.

#### D. Phase 5 : Evaluation et Amélioration:

C'est une phase très importante qui consiste à instaurer des indicateurs d'évaluation à chaque étape du processus d'implantation afin de s'assurer de la bonne exécution du projet et avoir un système d'évaluation fiable qui permet aux responsables de s'inscrire dans une démarche d'amélioration continue. L'évaluation doit porter sur tous les aspects, technique, organisationnel, financier et les compétences des acteurs du projet.

Dans l'objectif de détailler le déploiement des différentes phases de la démarche proposée, nous avons jugé que la validation à travers un cas d'étude reste une méthode appropriée pour ce type de démarche axée plutôt sur les aspects organisationnel et managérial [25]. Des travaux de mise en place de cette démarche ont été entrepris dans un site industriel d'une grande entreprise marocaine dans le domaine de la transformation chimique. L'accent sera mis sur les différents modèles et procédures pour bâtir un programme de maintenance basée sur l'analyse vibratoire. Dans ce papier, nous présenterons en détail les travaux de mise en place des deux premières phases qui sont déjà achevées. Ce chantier de mise en place a été mené par une équipe de 5 personnes et a duré 3 mois.

En général, la durée de mise en place dépend entre autres du niveau de maturité du système de management de la maintenance de l'entreprise et de la taille de son parc machines.

### III. DEPLOIEMENT DE LA PHASE ETAT DES LIEUX

Le démarrage de mise en place de la MCAV et sa pérennité dans l'entreprise demandent une préparation minutieuse permettant de collecter et analyser les données liées au parc machines et au personnel responsable de la surveillance vibratoire. Ce qui permet, par la suite, d'estimer l'impact d'un programme de surveillance sur le nombre de pannes, les coûts de maintenance et les taux de disponibilité de chaque machine tournante et ligne de production. Cette phase fig.2 qui fournit aux décideurs de la maintenance, l'état actuel en termes de performances des équipements et de compétences du personnel, doit permettre de fixer les valeurs de référence des indicateurs économiques indispensables à la mesure de rentabilité et de l'efficacité de tout programme de surveillance et à la responsabilisation des différents acteurs.

Dans cette phase, la première action à entreprendre est de procéder à une classification des équipements avant d'étudier leurs performances et la compétence du personnel chargé de la MCAV

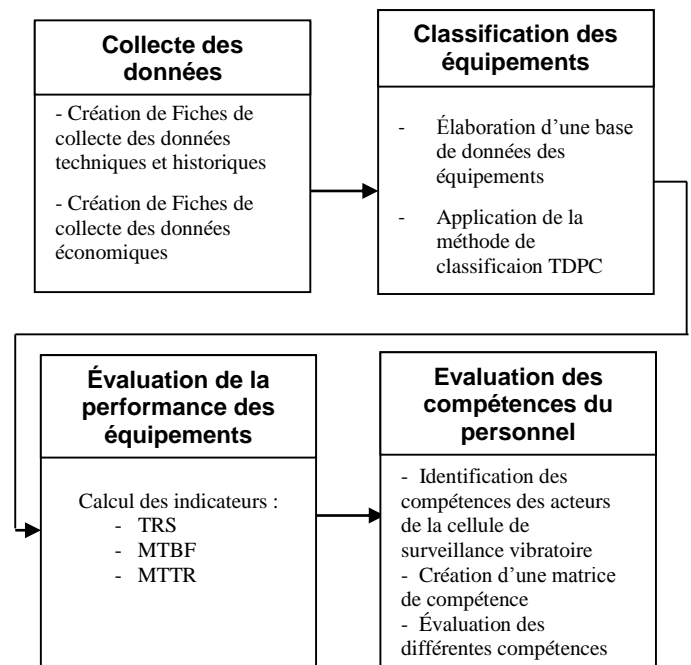


Fig 2. Etapes de la phase 1

#### A. Classification des équipements

Avant de commencer cette action, l'élaboration d'une base de données regroupant toutes les informations sur le parc machine, est recommandée pour faciliter le calcul de différents paramètres de classification.

Dans une installation industrielle, le niveau de maintenance fourni à un équipement est lié directement à la disponibilité fixée comme objectif. Ainsi, tous les équipements critiques ne doivent pas tomber en panne ou, au moins la défaillance doit être détectée et corrigée rapidement. Et comme les ressources d'un service de maintenance sont limitées, il est nécessaire de faire une classification et une priorisation des équipements pour concentrer l'effort sur ceux qui sont critiques [26]. Pour cette raison, plusieurs méthodes ont été développées afin de faire une classification des équipements. Certaines méthodes, utilisent l'effet de la défaillance sur le service pour la classification du parc machine [27] et d'autres se basent sur l'analyse des risques industriels comme l'HAZOP (HAZard and OPERability study) [28] ou sur les équipements de sécurité [29, 30]. Tandis que pour d'autres méthodes, l'objectif est de faire la classification des activités de maintenance à effectuer plutôt que de classer les équipements [31].

Dans cette phase de mise en œuvre de la MCAV, on applique la méthode multicritère TDPC (Temps de réparation, Degré d'influence, Probabilité de pannes, Criticité d'équipement par rapport à l'arrêt de production) [32] qui est un outil très efficace et très utilisé pour avoir un état des lieux sur la classification du parc machine.

##### 1) Méthode de classification TDPC

Comme son nom l'indique, la TDPC se base sur quatre critères regroupés dans le tableau 1.

TABLEAU I. CRITERE DE LA METHODE TDPC

Indice	Abréviation	description
Temps de réparation	T	Pris dans l'historique
Degré d'influence	D	Effet sur la sécurité, l'environnement, la qualité produit et les coûts
Probabilité de panne	P	La fréquence des pannes pendant une durée
Criticité de l'équipement	C	Basé sur la durée d'arrêt de production
Score de classification = T + D + P + C		

La procédure de classification qui nécessite la participation de tous les acteurs de l'atelier de maintenance et d'exploitation, se déroule comme suit :

- Etape 1 : lister tous les équipements de l'atelier de production ;
- Etape 2 : fixer un barème par critère ;
- Etape 3 : calculer le score de chaque équipement ;
- Etape 4 : faire une classification par ordre décroissant et regrouper les équipements comme il est indiqué sur le tableau 2.

TABLEAU II. CLASSES ET SCORES DE LA METHODE TDPC

Score de l'évaluation	Type de classe		Description de criticité
95% - 100%	Classe AA	5%	Criticité très élevée
80% - 95%	Classe A	15%	Criticité élevée
20% - 80%	Classe B	60%	Criticité moyen
0% - 20%	Classe C	20%	Criticité faible

2) Application : cas d'étude

- Préparation des données :

L'entreprise étudiée est composée de trois usines de transformation chimique. Chacune se caractérise par des processus industriels complexes exploitant un parc machine composé de turbines, de turbo-alternateurs, de turbosoufflantes, de broyeurs, de pompes, de ventilateurs, de systèmes d'engrenage et d'autre machines de grandes tailles. Notre étude de cas sera limitée à deux lignes de production chimique.

Avant d'entamer la classification des équipements de ces deux lignes, nous avons développé une base de données pour y stocker toutes les informations collectées.

Toutes les données obtenues lors de cette étude sont validées au fur et à mesure par l'équipe du projet en présence du responsable de la cellule de contrôle vibratoire.

Après cette étape de collecte de données qui nous a permis d'identifier 65 machines tournantes, nous avons passé aux étapes 2 et 3 pour l'établissement des barèmes de chaque critère et le calcul du score de toutes les machines tournantes, en faisant appel à l'historique, aux compétences techniques des agents de maintenance et à l'expérience des exploitants.

- Synthèse de la classification des équipements :

Après avoir fait la classification, nous avons trouvé que parmi les 65 machines tournantes étudiées 6.15 % possèdent une criticité très élevée et 15.39 % représentent une criticité élevée

(fig. 3). Ainsi, 21,54 % des machines tournantes demandent une surveillance importante. Avec ce pourcentage de machines critiques, la mise en œuvre de la MCAV dans cette entreprise s'avère nécessaire.

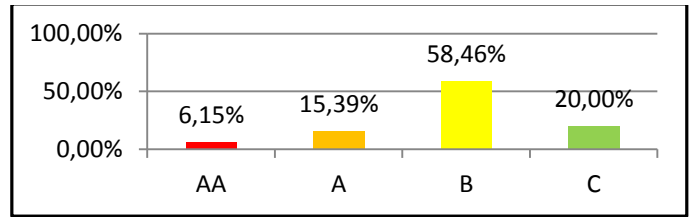


Fig 3. Résultat de la classification des machines tournantes

B. Evaluation de la performance des équipements

Dans l'industrie, il n'est pas possible de produire en « juste-à-temps » ou plus simplement de respecter les délais si les décideurs de la maintenance ne suivent pas de façon pertinente la disponibilité et la performance des moyens de production [33]. En outre, sans calcul des indicateurs de performance des équipements, il est difficile de justifier le coût de surveillance. De ce fait, le calcul de la performance du parc machine est indispensable pour quantifier, en permanence, la réussite du programme de la MCAV et justifier les investissements continus en ressources humaines et matériels, en prestation de services nécessaires à la poursuite de cette politique [14].

Pour évaluer la performance des machines tournantes des deux lignes étudiées, nous allons calculer le TRS [34], le MTBF et le MTTR [35,36] qui sont trois indicateurs de performance, largement exploités en maintenance pour suivre la disponibilité, la fiabilité et la maintenabilité d'un bien [37].

Le calcul de ces éléments sera effectué à partir de l'historique des pannes qui renseigne sur l'ensemble des événements qui ont été vécu par chaque équipement depuis sa mise en service. Pour faciliter le calcul, nous avons développé une fiche de collecte des données historiques liées à la vibration fig.4.

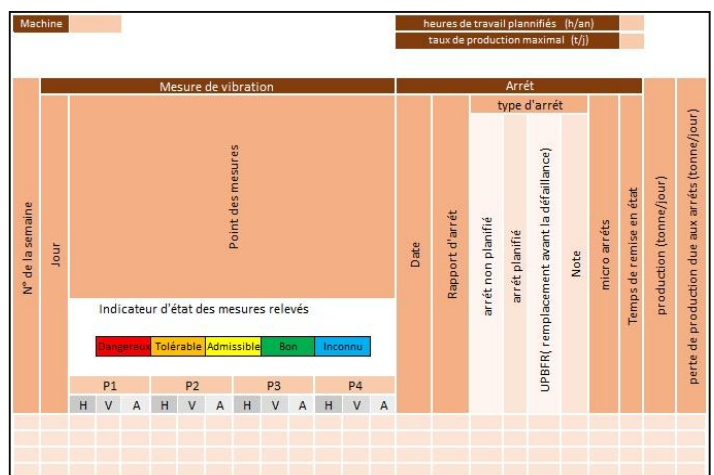


Fig 4. Fiche de collecte des données techniques et historiques

➤ Etude de la performance des équipements de l'entreprise étudiée :

Après avoir calculé tous les indicateurs de performance des machines tournantes, nous avons trouvé que :

- 16 équipements ont un MTBF très faible
- 16 équipements ont un MTTR très élevé

Devant cette situation, les responsables sont appelés à réagir pour améliorer la performance des équipements de ces deux lignes étudiées. Ainsi, pour leur montrer l'impact de la MCAV sur le parc machine étudié, nous avons calculé les deux taux suivants :

$$\frac{\text{Nbre heures arrêts causés par défauts de vibrations non détectés}}{\text{Nbre total d'heures d'arrêts}} = 20\%$$

$$\frac{\text{Nbre heures arrêts causés par défauts de vibrations non détectés}}{\text{Nbre total d'heures d'arrêts mécaniques subis}} = 32\%$$

Ces deux taux montrent qu'avec une politique performante d'une maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire, le service mécanique de cette entreprise peut diminuer le nombre d'heures d'arrêts mécaniques de 32% et le nombre total d'heures d'arrêts de 20%, ce qui justifie l'importance de cette technique dans l'industrie chimique.

### C. Évaluation des compétences du personnel de la cellule inspection

La surveillance par l'analyse vibratoire nécessite un ensemble de connaissances et de compétences pour assurer son bon déroulement, sa fiabilité et sa performance. Par conséquent, Il est nécessaire de mettre en place un suivi des compétences du personnel pour réaliser les activités de maintenance [24].

À tous les niveaux de responsabilité, la maintenance nécessite une certaine polyvalence [36]. Donc, les acteurs chargés de la surveillance et du diagnostic doivent être dotés d'un ensemble de compétences techniques et transversales.

Chaque agent de la cellule vibratoire doit maîtriser les compétences suivantes [14]:

- Créer et mettre à jour le fichier machines ;
- Définir et améliorer les méthodologies de surveillance ;
- Paramétrer la surveillance ;
- Collecter, traiter et archiver les données ;
- Analyser les évolutions ;
- Analyser les rapports des prestations sous-traitées ;
- Formuler les diagnostics ;
- Vérifier lors des démontages, le bien fondé des diagnostics et analyser les écarts éventuels ;
- Établir les signatures de référence après chaque remise en état ou modification ;
- Contrôler périodiquement la calibration des chaînes de mesures et l'état des capteurs ;
- Se tenir au courant des évolutions des techniques et du matériel de surveillance et de diagnostic.

En outre, il doit être doté des connaissances suivantes :

- Les principes de fonctionnement des machines ;
- Les pathologies des machines ;
- Les principes de mécanique vibratoires ;
- Le traitement du signal ;
- Les limites de validité des indicateurs de la surveillance ;
- Les images vibratoires et autres symptômes associés à chaque pathologie.

Dans l'objectif de faire un état des lieux en matière de compétences des agents de la cellule de surveillance, il est nécessaire de tracer une matrice de compétences et faire une évaluation du personnel selon deux critères :

- Le niveau de maîtrise (NM): définit sur quatre niveaux (non maîtrisé (score : 0), débutant (1), intermédiaire (2) et expert(3)) ;
- Le taux d'utilisation (TU): définit sur quatre niveaux (jamais utilisé (0), utilisé de temps en temps (1), utilisé souvent (2) et utilisé tous le temps(3)).

Nous avons proposé ces deux critères pour évaluer le niveau de maîtrise des acteurs de la cellule vibratoire et voir quelles sont les tâches fréquentes dans la fonction de chacun.

Pour faire cette évaluation, nous avons procédé comme suit :

- Préparation de la liste des acteurs de la cellule vibratoire ;
- Décomposition des compétences, citées ci-dessus, en ensemble de tâches comme le montre la fig. 5;
- Instruction de la matrice de compétences en notant chaque acteur, suite à un entretien individuel, selon le barème prédéfini pour chaque critère NM et TU.

Les résultats de cette matrice doivent permettre de définir, dans les phases 3 et 4 de notre démarche, les besoins en compétences et en formation.

#### ➤ Synthèse :

La matrice de compétences de la cellule interne de surveillance, nous permet d'avoir un état des lieux en matière de

Compétence	Tâche	Agent 1		Agent 2		Agent 3		Agent 4		Agent 5	
		NM	TU	NM	TU	NM	TU	NM	TU	NM	TU
Définir et améliorer les méthodologies de surveillance	Mettre en place une méthodologie de surveillance.	3	1	2	2	2	3	2	2	2	2
	Appliquer les modes opératoires de surveillance.	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2
	Suivre et organiser les inspections selon la planification prédéfinie.	3	3	3	3	2	3	2	1	2	3
	Appliquer une méthodologie adaptée à chaque type de surveillance.	3	3	1	2	2	3	2	1	2	3
	Analyser les rapports de prestation sous-traitée	2	3	1	1	2	3	2	1	0	0
	Mener une réflexion sur des améliorations des méthodologies de surveillance.	2	1	1	1	2	3	1	1	1	1

Fig.5. Évaluation et décomposition de la compétence « Définir et améliorer les méthodologies de surveillance » en ensemble de tâches.

niveau de maîtrise du personnel et d'identifier l'écart en compétences chez les acteurs de la cellule de surveillance.

À l'exception du responsable de la cellule de vibration, le niveau de maîtrise reste insuffisant chez les autres acteurs. Le calcul de TU a montré que cette insuffisance touche plusieurs tâches d'utilisation fréquente. Ce constat peut compromettre la pertinence de la surveillance de notre parc machines.

#### IV. DEPLOIEMENT DE LA PHASE ÉTUDE DE LA FAISABILITE

La deuxième phase relative à l'étude de la faisabilité s'avère indispensable pour analyser les enjeux technoéconomiques et l'aspect organisationnel pour prendre la décision de continuer le projet de mise en place de la MCAV ou de chercher d'autres politiques de maintenance. Cette étude s'intéresse à trois volets comme il est indiqué dans la fig. 6

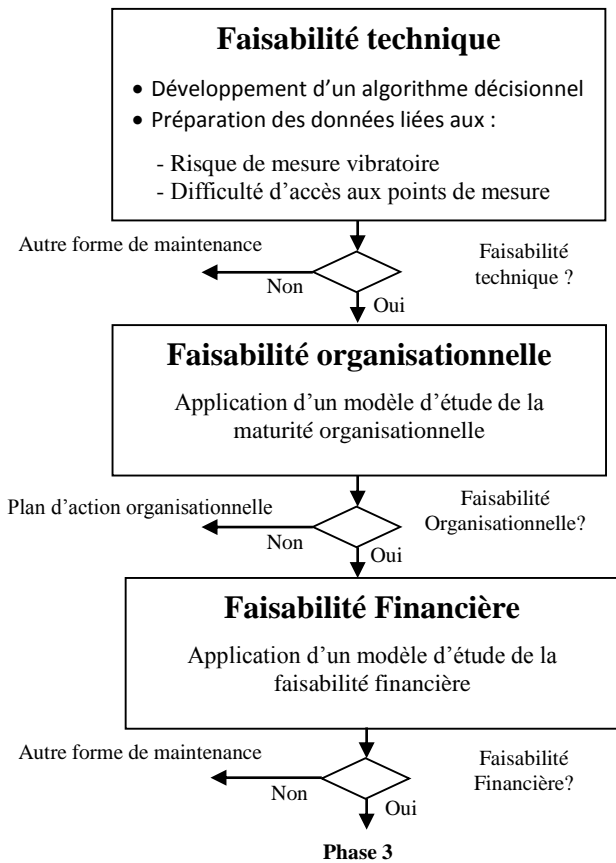


Fig. 6. Etapes de la phase 2

##### A. Étude de la faisabilité technique

Pour étudier cette faisabilité, nous avons développé un algorithme décisionnel de la faisabilité technique d'analyse vibratoire d'une machine tournante présenté dans la fig. 7.

Pour débiter l'application de cet algorithme, on commence par la préparation des données suivantes :

- Liste des machines tournantes avec leurs vitesses;
- L'analyse des risques liés à la collecte des mesures;
- La difficulté d'accès aux points de mesure vibratoire ;

Après la préparation des données, on procède à l'application de l'algorithme décisionnel comme suit :

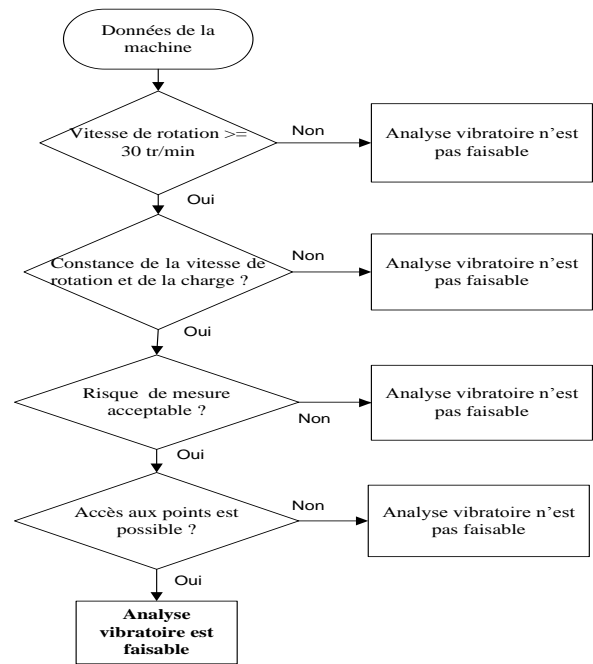


Fig. 7. Algorithme décisionnel sur la faisabilité technique d'analyse vibratoire sur un machine tournante

##### 1) Vérification de la vitesse de rotation :

La durée de prise de la mesure est inversement proportionnelle à la résolution utilisée et au nombre de spectres instantanés à moyenner par le collecteur [38]. Cette durée de mesure dépend encore des fréquences des manifestations vibratoires de certains défauts dont on veut surveiller l'apparition, et qui peuvent être sensiblement plus faibles que la fréquence de rotation (fréquence de passage de courroies, fréquence de passage de pôles, fréquence d'instabilité, fréquence de coïncidence de denture). En outre, pour une question de représentabilité du signal mesuré qui exige une durée de prise de mesures (temps d'observation) égale au minimum à 30 ou 50 rotations de la ligne d'arbre considérée, soit à titre d'exemple environ : 1 seconde pour la surveillance d'une machine tournant à 3 000 tr/min, 10 secondes pour la surveillance d'une machine tournant à 300 tr/min, 100 secondes pour la surveillance d'une machine tournant à 30 tr/min [39], l'analyse vibratoire n'est, par conséquent, pas possible pour des machines tournant à des vitesses très faibles.

##### 2) Constance de la vitesse de rotation et de la charge :

L'objectif de l'analyse vibratoire est d'identifier des défauts de vibrations à partir de l'identification des périodicités de la manifestation de leurs forces dynamiques et de la corrélation de ces dernières avec la cinématique de l'équipement surveillé. Le lien entre les forces dynamiques induites en présence de défaut, la vitesse de rotation et la charge de la machine, ainsi que le lien entre la fonction de transfert force↔vibration et la vitesse de rotation rendent difficile la surveillance et le diagnostic de machines dont le cycle de fonctionnement ne comporte pas de

phase à vitesse et charge constantes. Pour ce type de machine, la surveillance nécessite l'utilisation de techniques de traitement et de mise en œuvre délicates (analyse temps/fréquence, spectrogramme...) [39]. Donc, la constance de la charge et de la vitesse de rotation durant la prise de mesure est un critère important pour la faisabilité technique.

3) *Analyse des risques lié à la mesure vibratoire :*

L'analyse des risques est une étape importante pour l'étude de la faisabilité technique. Pour les installations qui présentent un risque majeur sur le personnel d'inspection, il faut éviter la prise de mesure de leurs machines tournantes. Le référentiel OHSAS 18001 peut servir comme guide pour l'évaluation des risques des machines tournantes.

4) *L'étude de l'accès aux points de mesure*

La grande majorité des défauts recherchés, à l'exception des desserrages des éléments statiques, affectent les parties tournantes de la machine. Par contre, pour des raisons de commodité et de coût, la quasi-totalité des prises de mesures (à l'exception de certaines mesures qui nécessiteront parfois l'utilisation de capteurs fixés sur l'arbre et radiocommandés) s'effectuent sur une partie immobile de cette dernière. Les paliers constituant la partie immobile d'une machine la plus proche des rotors, c'est donc sur ces derniers et éventuellement sur les points de fixation de la machine que les mesures seront généralement effectuées, dans la ou les directions d'application des efforts. Il convient donc de vérifier que les machines et leurs paliers sont directement accessibles (absence de calorifugeage, capotage, double enveloppe, machine en hauteur et difficilement accessible, environnement hostile...).

Après l'étude de la faisabilité technique, une de ces deux décisions doit être prise : abandonner le projet de mise en œuvre de la MCAV et chercher d'autres formes de maintenance si l'analyse vibratoire n'est pas faisable sur aucune machine ; Sinon, passer à l'étude de la faisabilité organisationnelle de la MCAV.

➤ **Application au cas d'étude**

Pour les 65 machines tournantes étudiées, nous avons trouvé que :

- Les vitesses de rotation sont comprises entre 715 tr/min et 1500 tr/min ;
- Les risques liés aux mesures vibratoires sont acceptables ;
- L'accès aux points de mesure est possible pour toutes les machines
- La constance de la charge et de la vitesse est bien vérifiée.

Sur le plan technique, l'analyse vibratoire est possible pour toutes les machines tournantes des deux lignes de production étudiées. Ainsi, après la vérification de la faisabilité technique, on passe à l'étude de la faisabilité organisationnelle.

*B. Étude de la faisabilité organisationnelle*

L'évaluation de la maturité organisationnelle est une tâche importante. Elle permet de voir si l'organisation mise en place de la maintenance est prête pour accueillir la MCAV ou non. Les résultats d'une telle évaluation permettent de donner aux décideurs des informations objectives sur les moyens à mettre en œuvre pour améliorer les fonctionnalités de la maintenance par une meilleure planification des actions et un bon choix des

outils informatisés et des outils et techniques de gestion appropriés. L'audit peut être utilisé comme outil pour voir si l'organisation est suffisamment mature pour l'implantation de la MCAV et il permet, en même temps, d'avoir un ensemble de données qui peuvent être exploitées dans les phases suivantes de la démarche de mise en œuvre.

Plusieurs modèles ont été proposés pour évaluer la maturité dans divers domaines, la gestion de la qualité, le développement des logiciels et des produits, la relation client/fournisseur, la recherche et le développement [40]. Quant à l'organisation de la maintenance, Fernandez et al [41] ont proposé une grille de maturité de la maintenance basée sur celle développée par Crosby [42] pour l'étude de la maturité dans le domaine de la gestion de la qualité. Malheureusement, les critères sélectionnés dans cette grille traitent la gestion de la maintenance sans traiter ses spécificités.

Parmi les modèles de maturité développés dans la littérature, nous avons choisi celui de Cholasuke et al [43] qui est largement appliqué dans l'industrie, pour évaluer la maturité de l'organisation de la maintenance.

Le modèle choisi est basé sur une grille d'évaluation de 10 facteurs : l'efficacité de la maintenance ; le déploiement et l'organisation politique ; l'approche de la maintenance, la planification des tâches et l'ordonnancement ; la gestion de l'information et la GMAO ; la sous-traitance de la maintenance ; l'amélioration continue ; les aspects financiers ; la gestion des ressources humaines ; la gestion des pièces de rechange. Chaque facteur est à évaluer suivant 3 niveaux de maturité : Niveau 1 : innocence ; Niveau 2 : compréhension ; Niveau 3 : excellence.

L'analyse de cette grille d'évaluation doit permettre d'estimer, en fonction de différents niveaux obtenus pour chaque facteur, la maturité globale de l'organisation de la maintenance.

Si le niveau de maturité de quelques facteurs est faible, des actions d'amélioration peuvent être mises en place. Sinon, on passe pour étudier la faisabilité financière de la mise en place de la MCAV.

➤ **Application au cas d'étude**

Pour renseigner la grille de maturité adoptée pour notre démarche de mise en place de la MCAV, nous avons associé tous les acteurs intervenants dans la fonction maintenance et nous avons exploité les différentes fiches et procédures du processus mis en place. La synthèse de l'étude présentée dans la fig. 8 montre bien les efforts fournis par la société dans l'organisation de la maintenance conditionnelle. L'atteinte du

	Niveau
1. L'efficacité de la maintenance (sortie)	Excellence
2. Déploiement et l'organisation politique	Excellence
3. Approche de la maintenance	Compréhension
4. Planification des tâches et ordonnancement	Excellence
5. Gestion de l'information et GMAO	Compréhension
6. La sous-traitance de maintenance	Compréhension
7. L'amélioration continue	Compréhension
8. Les aspects financiers	Compréhension
9. Gestion des ressources humaines	Excellence
10. La gestion des pièces de rechange	Compréhension

Fig. 8. Résultat de l'étude de la maturité de l'organisation de la maintenance au sein de l'entreprise étudiée



2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> niveau de maturité pour l'ensemble des activités indique que la société a priorisé le développement de son organisation le long de son parcours pour atteindre les meilleurs résultats.

La conclusion qu'on peut déduire de cette étude est que, sur le plan organisationnel, notre entreprise a atteint une certaine maturité pour que la mise en place de la MCAV réussisse.

### C. Faisabilité financière

Beaucoup de chercheurs ont essayé d'évaluer les gains financiers générés par la mise en place d'une maintenance efficace. On citera, entre autres, Ahlmann [44], Maggard et Rhyne [45], Foelkel [46], Coetzee [47], Walsh [48], Miller [49], Ralph [50], Carter [51], Kutucuoglu et al. [52] et Swanson [53]. Cependant, ces études ne discutent pas comment estimer les différents coûts qui rentrent dans le calcul du profit global généré, ni comment les extraire du système d'information comptable de l'entreprise étudiée. Par contre, le modèle développé par al-najjar et alsyouf [54] pour l'identification, le suivi et l'amélioration de l'impact économique de la maintenance basée sur l'analyse vibratoire, permet l'identification des différents coûts liés à la MCAV. Ce modèle simple permet de calculer les différents coûts, liés à la maintenance, relatifs au cycle de vie de l'équipement. Ces coûts concernent le coût des pertes économiques liées à la maintenance (panne, micro arrêt, non qualité, ...), les coûts directs de la maintenance, le coût d'investissement en maintenance ainsi que le épargnes dues à la mise en œuvre d'une maintenance efficace telle la MCAV. La ventilation de ces coûts permettent, après analyse, d'évaluer la pertinence de la politique de maintenance adoptée et de prévoir où, pourquoi, comment et combien d'argent devrait être investi en maintenance, et juge si l'investissement a été rentable ou non. Ce modèle a été testé et validé dans une entreprise suédoise du secteur industriel du papier qui utilise de la MCAV pour la surveillance de ses machines tournantes.

#### ➤ Application au cas d'étude

Les coûts du modèle adopté sont identifiés à partir des données d'entrée techniques et économiques. Pour faciliter et fiabiliser la collecte de ces données, deux fiches ont été développées pour préparer les données techniques et économiques fig. 4 et fig. 9.

L'étude porte sur deux turbines qui sont très critiques. Après la collecte des données, nous avons évalué les coûts suivants :

		Coûts	
données économiques	coûts directs de la maintenance	Cout de main d'œuvre maintenance	
		Pièce de rechange + outils	
		Managements	
	Coûts indirects de la maintenance	Externalisation ( sous-traitances )	
		Chômage des machines ( l'amortissement )	
		Cout de recyclage du produit	
		Pertes de productions durant les arrêts	
		Pénalités due au retard de livraison	
	Données économiques Générale	Les indemnités d'accidents	
		Pénalités liées à l'environnement	
		Marge bénéficiaire	
		Coûts fixes d'exploitation	
		Coûts variables d'exploitation	
		Investissements dans la maintenance	
		Inventaire des pièces de rechange	
Coûts d'énergie			
Assurance			

Fig. 9. Fiche de collecte des données sur les coûts

- Le coût des pertes en production causées par ces deux turbines en 2014 (on ne comptabilise que les arrêts qu'on peut éviter par une surveillance par analyse vibratoire) : estimation de 160 millions de dirhams.
- Le coût lié à la sous-traitance de la maintenance de ces deux turbines à cause des défauts de vibration : estimation de 10 millions de dirhams.
- La valeur du stock des pièces de rechange liées à la MCAV est estimée à 400 millions de dirhams.
- Le coût des investissements liés à la MCAV est estimé à 18 millions de dirhams.

Le ratio présentant le coût d'investissement en MCAV par rapport aux autres coûts est de 3%. Il est clair donc que l'investissement dans la MCAV est très négligeable par rapport aux coûts de l'inefficacité de la surveillance de ces équipements par analyse vibratoire. On peut conclure que l'amélioration de la productivité par la réduction des arrêts liés aux défauts de vibration par le biais d'une surveillance vibratoire efficace est possible et l'investissement dans le matériel et le personnel de la cellule vibratoire est largement justifié.

### V. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons présenté les travaux de mise en place et de validation des deux premières phases de la démarche de mise en œuvre de la MCAV proposée. L'application des différents modèles scientifiques et les outils que nous avons développés nous ont permis de présenter aux responsables de la maintenance des informations objectives, d'une part, sur l'état des lieux du parc machine et du personnel de la cellule vibratoire et d'autre part, sur la faisabilité technique, organisationnelle et financière de la MCAV. Malgré les difficultés rencontrées pour collecter des données fiables, les objectifs attendus de ces deux phases ont été réalisés. Avec les données de l'état des lieux et les résultats de l'étude de la faisabilité, nous avons obtenu l'engagement de la direction pour continuer la mise en place de notre démarche.

À l'issue de cette étude de faisabilité, nous avons présenté la suite de ce projet de mise en place avec un calendrier de réalisation aux responsables de maintenance. À ce stade, nous avons associé la direction qui doit se prononcer sur les différentes options proposées, notamment au niveau des acteurs de mise en œuvre, afin de permettre au projet d'avancer jusqu'à sa phase finale. Les orientations arrêtées, permettent de déterminer l'enveloppe financière du projet et figer de manière détaillée le programme de surveillance associé au parc machines. Les travaux futurs consisteront alors à traduire les trois dernières phases de notre démarche en un processus d'exécution bien détaillé, en élaborant les procédures de mise en place et les indicateurs d'évaluation garants de la réussite du projet.

### REFERENCES

- [1] F. Bogardd, Développement d'une approche numérique visant à optimiser le suivi vibratoire des constituants d'une machine tournante, thèse, université de Reims Champagne – Ardenne, 2000.
- [2] B. Al-NAJJAR, Condition-Based Maintenance: Selection and Improvement of a Cost-Effective Vibration-Based Policy in Rolling Element Bearings, Doctoral Thesis, Lund University, Sweden, 1997.

- [3] M. Bevilacqua and M. Braglia, The Analytic Hierarchy Process Applied to Maintenance Strategy Selection. *Reliability Engineering and System Safety*, 70(1), pp. 71-83, 2000.
- [4] J. Lyxhøj, J. Riis and U. Thorsteinsson, Trends and Perspectives in Industrial Maintenance Management. *Journal of Manufacturing Systems*, 16(6), pp. 437-453, 1997.
- [5] J. Riis, J. Lyxhøj and U. Thorsteinsson, U. (1997). A Situational Maintenance Model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 14(4), pp. 349-366, 1997.
- [6] I. Alsayouf, Cost Effective Maintenance for Competitive Advantages. Doctoral Dissertation, Växjö University, Växjö, Sweden, 2004.
- [7] P. Jonsson, The Status of Maintenance Management in Swedish Manufacturing Firms. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 3(4), pp. 233-258, 1997.
- [8] M. Bengtsson, On condition based maintenance and its implementation in industrial setting, These, Mälardalen university, Suède, 2007.
- [9] M. Bengtsson, Condition based maintenance systems –an investigation of technical constituents and organizational aspects. These, Mälardalen university, Suède, 2004.
- [10] C. Moya, How To Set Up a Predictive Maintenance Program, *Quality Progress*, 36(3), pp. 56-62, 2003.
- [11] B.F. Mitchell and R.J. Murry, Predictive Maintenance Program Evolution – Lessons Learned, “1995 PROCEEDINGS Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium”, Washington D.C., pp. 7-10, 1995.
- [12] R. Mobley, An Introduction to Predictive Maintenance”. Butterworth-Heinemann/Elsevier Science, USA. ISBN 0-7506-7531-4, 2002
- [13] G. Trodd, Practical Implementation of Predictive Maintenance, “Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1998”, USA, Portland, ME, 1998, pp. 29-37.
- [14] A. Boulenger and C. Pachaud, Analyse vibratoire en maintenance - Surveillance et diagnostic des machines, Dunod, Paris, 2007.
- [15] W.Q. Wang, F. Ismail and M. Farid Golnaraghi, Assessment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15 (5), pp. 905-922, 2001.
- [16] A.H.C. Tsang, Strategic dimensions of maintenance management, *J Qual Maint Eng*, 8(1):7-39, 2002.
- [17] M.C. Carnero, An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programmes, *Reliab Eng Syst Saf*, 91:945-63, 2006.
- [18] R. Chevalier, Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF, RFM, 2001.
- [19] R. Chaib, Contribution à l'optimisation de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire, These, University of Mentouri-Constantine, Algérie, 2006.
- [20] A. Garg and S. Deshmukh, Maintenance management: literature review and directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(3):205-238, 2006.
- [21] J. Courrech and R.L. Eshleman, *CONDITION MONITORING OF MACHINERY*. Fifth, New York, 2002.
- [22] E.M. Semma, A. Mousrij and H. Gziri, Elaboration of an implementation approach of a condition-based maintenance through vibration analysis, *MATEC Web of Conferences*, Vol 20, p 07003, 2015.
- [23] E.M. Semma, A. Mousrij and H. Gziri, Evaluation de la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire : Etude de cas, *Revue Management et Ingénierie des Systèmes*, Vol.3, pp. 40-52, 2014.
- [24] G. Laloux, *Management de la maintenance selon l'ISO 9001: 2008*, AFNOR, France, 2009.
- [25] R.K. Yin, *Case Study Research, Design and Methods* (2nd edition). Thousand Oaks: Sage Publications, Inc, 1994.
- [26] F. Gomez and J.J.R. Cartagena, Maintenance strategy based on a multicriterion classification of equipments, *Reliability Engineering & System Safety* 91(4), 444-451, 2006.
- [27] K. Bahrami-G and J. Price, *Mantenimiento basado en el riesgo. Gestión de activos industriales*, año III, número 9, enero/2000, Edit, Alción. Madrid, 2000.
- [28] J. Casal, H. Montiel and E. Planas, *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*, Ediciones UPC, Barcelona, 1999.
- [29] P. Hokstad, P. Flotten, S. Holmstrom, F. McKenna and T.A. Onshus, reliability model for optimisation of test schemes for fire and gas detectors. *Reliability Eng Syst Saf* 1995; 47:15-25.
- [30] M. Cepin, Optimization of safety equipment outages improves safety. *Reliability Eng Syst Saf* 2002;77:71-80.
- [31] D.H. Stamatis, *Failure mode and effect analysis: fmea from theory to execution*. Portland, Or: Publ. American Society for Quality; 2003.
- [32] H. Stadhouders, *A Framework for implementing Condition Based Maintenance based on Operational Data*, These, Eindhoven University of Technology, Netherlands, 2011.
- [33] J. Bufferne, *Fiabilité des équipements : Application à la maintenance industrielle*, Thebookedition, 2013,
- [34] S. Nakajima, *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge, Productivity Press, 1988.
- [35] H. Kaffel, *La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre*, Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, 2001
- [36] F. Monchy, *Maintenance - Méthodes et organisation*, Dunod, Paris, 2000
- [38] M. Oliveira, I. Lopes and D. Figueiredo, *Maintenance Management Practices of Companies of the Industrial Pole of Manau*, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II WCECS 2014, 22-24, San Francisco, USA, 2014.
- [37] M. Thomas, *Fiabilité, maintenance prédictive et vibrations des machines*, Université du Québec, ÉTS, Montréal, Canada, 2012.
- [39] A. Boulenger et C. Pachaud, *Surveillance des machines par analyse des vibrations, Aide-mémoire*, Dunod, Paris, 2009.
- [40] J.P. Clarkson, A.M. Maier and J. Moultrie, *Development maturity grids for assessing organizational capabilities: Practitioner guidance*. University of Cambridge, 2009.
- [41] O. Fernandez and W. Labib, A decision support maintenance management system: Development and Implementation. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol.20, No 8, pp. 965-979, 2003.
- [42] P.B. Crosby, *Quality is free: The art of making quality certain*. New York, NY: McGraw-Hill Companies, 1979.
- [43] C. Cholasuke, R. Bhardwa, and J. Antony, The status of maintenance management in UK manufacturing organizations: results from a pilot survey, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 5-15, 2004.
- [44] H. Ahlmann, *The Economic Significance of Maintenance in Industrial Enterprises*. Lund University, Lund Institute of Technology, Sweden, 1998.
- [45] B.N. Maggard and D.M. Rhyne, Total productive maintenance: A timely integration of production and maintenance, *Production and Inventory Management Journal*, Alexandria 33 (4), 6-11, 1992.
- [46] C. Foelkel, A business-oriented approach to maintenance. *Tappi Journal* 81 (September), 67-69, 1998.
- [47] J. Coetzee, A holistic approach to the maintenance problem, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 5 (3), 276-280, 1999.
- [48] K. Walsh, Predictive maintenance profits from sensor diagnostics. *InTech* 46 (6), 36-42, 1999.
- [49] D. Miller, Profit from preventive maintenance, *Bulk solids handling*. Elsevier Engineering Information 20 (1), 57-61, 2000.
- [50] W.P. Ralph, *Maximising value from maintenance operations*. Material Handling Management, Cleveland, June, 2000.
- [51] R.A. Carter, Shovel maintenance gains from improved designs, tools and techniques. *Elsevier Engineering Information* 106 (8), S7, 2001.
- [52] K. Kutucuoglu, J. Hamali, Z. Irani and J. Sharp, A framework for managing maintenance using performance measurement systems. *International Journal of Operations and Production Management* 21 (1/2), 173-194, 2001.
- [53] L. Swanson, Linking maintenance strategies to performance. *International Journal of Production Economics* 70, 237-244, 2001.
- [54] B. Al-Najjar and I. Alsayouf, Enhancing a company's profitability and competitiveness using integrated vibration-based maintenance: A case study, *European Journal of Operational Research* 157, 643-657, 2004.