

ELABORATION D'UNE POLITIQUE DE MAINTENANCE PREVISIONNELLE BASEE SUR LA QUALITE DES PRODUITS

Hassan GZIRI*, Ahmed MOUSRIJ*, Fouad RIANE**, Elbachir ELKIHHEL***

Résumé. - Dans cet article, nous présentons une méthodologie d'élaboration d'une politique de maintenance prévisionnelle basée non pas sur le suivi des caractéristiques machines, mais plutôt sur le suivi et le contrôle des caractéristiques des produits fabriqués. Elle se base sur l'exploitation des données issues du système de contrôle qualité, souvent exigé par des logiques de certification. Les non-conformités observées sur les produits fabriqués sont souvent les conséquences de dysfonctionnements des processus de mise en œuvre et de défaillances des équipements de production. Nous démontrons dans cet article qu'en liant les caractéristiques des produits à ceux des processus, on peut facilement identifier l'équipement à incriminer face à une occurrence de non-conformité, et extrapoler l'évolution dans le temps de cette non-conformité pour la traduire en une évolution d'une mesure de dégradation de l'état des équipements de production. La logique de fonctionnement de cette démarche est explicitée à travers un exemple pédagogique. Pour illustrer les différents concepts et fondements de la méthodologie, nous la déployons dans le cadre de deux cas industriels marocains.

Mots-clés : Maintenance prévisionnelle, Carte de contrôle, Plan de contrôle, AMDEC, Matrice des caractéristiques.

* Professeur assistant, Laboratoire de mécanique et de productique, faculté des sciences et techniques de Settat, Maroc : hgziri@gmail.com mousrij@gmail.com.

** Professeur, Centre de recherche en gestion industrielle, Faculté universitaire catholique de Mons, Belgique. fouad.riane@fucam.ac.ma.

*** Professeur de l'enseignement supérieur, laboratoire de génie industriel, maintenance et production mécanique d'Oujda, Maroc.elbachir@netcourrier.com.

1. Introduction

Les systèmes de production sont souvent sujets à des détériorations dues à leur âge, à leur simple utilisation ou à leur condition d'exploitation. La complexité des processus de production, la grande variété des produits fabriqués, et l'incertitude affectant l'environnement de production sont à l'origine de dysfonctionnements critiques. Ces dysfonctionnements occasionnent des pannes coûteuses, des retards de livraison considérables et induisent une production de faible qualité.

Dans un contexte économique caractérisé par une concurrence féroce, les efforts de rationalisation des coûts de production et des pratiques de maintenance des installations industrielles ne cessent de se multiplier. Parallèlement, les efforts conjugués pour développer des avantages concurrentiels progressent au rythme du développement des technologies, des compétences et des organisations. La fonction de maintenance devient un vrai levier de performance et de compétitivité des entreprises, jouant un rôle fondamental dans la maîtrise du coût global des équipements, de la qualité et des délais de livraison des produits et services. La fonction maintenance n'est plus perçue comme un centre de coût mais plutôt comme un centre de profit (Alsayouf, 2007 ; Kutucuoglu et al., 2001). Elle consiste de plus en plus à anticiper et à éviter l'occurrence des dysfonctionnements. Une maintenance bien gérée permet en effet de diminuer les coûts associés à ces dysfonctionnements en augmentant la fiabilité globale et la disponibilité de l'outil de production et en chassant les gaspillages dus à la fabrication des produits non-conformes (Al-Najjar et Alsayouf, 2000).

Plusieurs types de politiques de maintenance peuvent être envisagés dépendamment du contexte industriel, de l'objectif de gestion et de l'état des équipements à maintenir. On passe ainsi de maintenance de type correctif à des politiques de maintenance préventive qui se traduisent par l'élaboration des plans d'interventions sur l'équipement considéré.

Si les actions de maintenance corrective sont entreprises une fois que le dysfonctionnement est subi, les actions préventives sont réalisées soit de façon systématique selon des calendriers prédéfinis, soit en fonction du suivi de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation des équipements (Hongzhou, 2002). Ces actions permettent d'anticiper les pannes, mais souvent au prix d'un important investissement en maintenance.

La maintenance systématique souvent réalisée sur indication des prescriptions du constructeur amène parfois à changer des pièces qui sont encore en état de fonctionnement et dégradent inévitablement l'état de l'équipement suite aux multiples interventions. Néanmoins, l'impact des plans de maintenance préventive dynamique sur les performances du système reste un problème ouvert (Gupta et al., 2001). La maintenance conditionnelle quant à elle est parfois très difficile à mettre en œuvre. Elle exige en effet une instrumentation particulière, des compétences spécifiques pour la collecte des données leur analyse et leur interprétation. Elle est

surtout tributaire de la définition de grandeurs physiques accessibles et mesurables traduisant la dégradation de l'équipement, figure 1.

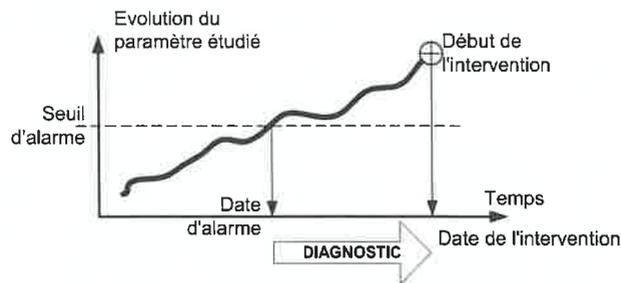


Figure 1 : Maintenance préventive conditionnelle.

Pour certains équipements critiques, il est nécessaire d'évoluer vers une maintenance prévisionnelle anticipant l'apparition d'une défaillance en exploitant les prévisions extrapolées de l'analyse des paramètres significatifs de la dégradation du bien.

2. La maintenance prévisionnelle

Les contraintes d'exploitation deviennent de plus en plus sévères et la continuité de service assuré par les installations de production est de plus en plus exigée. Ceci amène les exploitants à une surveillance accrue de l'état de leurs outils. Les entreprises opèrent donc des choix parmi les différents types de maintenance en fonction de multiples éléments techniques, économiques, de facteurs internes et externes. Waeyenbergh et Pintelon, 2004 présentent un cas d'étude illustrant les différentes étapes de la démarche à suivre pour la réussite de l'implantation d'un système de gestion de maintenance. Cette démarche fournit les directives utiles pour la prise de décision concernant la politique de maintenance à adopter.

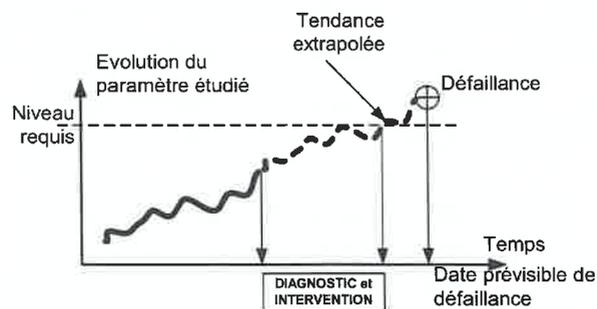


Figure 2 : Maintenance préventive prévisionnelle.

En fonction de l'évolution des technologies de diagnostic et de contrôle des équipements et du suivi de leur dégradation, les gestionnaires cherchent à adopter d'avantage des politiques

de maintenance prévisionnelle basées sur l'extrapolation des résultats de ces suivis. Des approches de maintenance prévisionnelle sont ainsi développées subordonnées à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien à maintenir. Ces actions sont donc exécutées en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de la dégradation, figure 2.

La mise en œuvre d'une stratégie de maintenance prévisionnelle a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Carnero, 2005, a développé un modèle de sélection de techniques de diagnostic et d'instrumentation dans un programme de maintenance prévisionnelle combinant l'analyse vibratoire et l'analyse des huiles. Ce modèle est basé sur les deux outils de recherche opérationnelle, le Processus d'Analyse Hiérarchique et l'Analyse Factorielle. Mckone et Weiss, 2002, ont proposé quant à eux une démarche à suivre pour réussir l'implémentation d'une maintenance prévisionnelle. Carnero, 2004, a proposé un système composé d'indicateurs pour contrôler l'instauration d'un Programme de Maintenance Prévisionnelle (PMP) afin de faciliter la détection précoce des anomalies susceptibles d'apparaître durant l'implantation de ce programme. Les indicateurs proposés sont classés en quatre catégories : l'évaluation économique, la structure organisationnelle, la qualité externe (processus et produit) et qualité interne (procédures de détection, diagnostic et correction des irrégularités lors de l'implantation du PMP) et l'évolution dans le temps.

Néanmoins, les contributions scientifiques et industrielles dans ce domaine ne permettent pas de construire systématiquement une solution optimum. Dans ce contexte, Léger, 1999, a proposé un cadre de modélisation pour formaliser la conception d'un système de maintenance prévisionnelle. Cette formalisation, basée sur l'association des trois processus fondamentaux (processus de surveillance et diagnostic, processus de pronostic et processus d'aide à la décision), aboutit à la définition d'un système intégré de maintenance prévisionnelle.

La maintenance prévisionnelle est plus que jamais au centre des débats. Sa pertinence fait l'unanimité, mais elle reste peu pratiquée sur le terrain. Elle exige en effet une instrumentation spécifique et une logistique importante à mettre en place derrière, avec des coûts de formation et d'encadrement technique. Toutefois, la rationalité économique des gestionnaires impose d'adopter des politiques de maintenance moins coûteuses.

Afin de répondre à ces impératifs, nous proposons dans cette recherche une approche de maintenance prévisionnelle basée sur l'analyse de la non-conformité des pièces fabriquées. Elle consiste à exploiter les données issues du système de contrôle qualité, souvent exigé par des logiques de certification. Les non-conformités observées sur les produits fabriqués sont souvent les conséquences de dysfonctionnements des processus de mise en œuvre et de défaillances des équipements de production.

Si on arrive à lier les caractéristiques des produits aux processus, on peut facilement identifier l'équipement à incriminer face à une occurrence de non-conformité. On peut aller plus loin et extrapoler l'évolution dans le temps de cette non-conformité pour la traduire en une évolution d'une mesure de dégradation de l'état des équipements de production. On peut ainsi élaborer une politique de maintenance moyennant une approche d'intégration de la qualité.

Cette problématique a été rencontrée auprès d'industriels marocains du secteur de fabrication de meubles en bois de chêne et des sacs d'emballage. Ces industries cherchent à se positionner sur des marchés de plus en plus globalisés. Ils sont à la recherche de conditions optimales d'application des actions de la maintenance, fondée non nécessairement sur la surveillance des équipements et la connaissance de leur état de dégradation, mais plutôt sur le suivi de l'évolution des conséquences de ces dégradations sur la qualité des produits fabriqués.

Dans le présent article, nous explicitons les fondements de cette approche d'intégration. Nous illustrons sa logique de fonctionnement à travers un exemple pédagogique. Nous appliquons la démarche sur deux exemples industriels et discutons ses limites et les perspectives de recherche associées à ce sujet.

3. Maintenance basée sur la qualité des produits fabriqués

Les différentes techniques basées sur l'intégration maintenance/qualité essayent d'établir une politique de maintenance préventive basée sur la non-conformité des produits fabriqués. Néanmoins ces techniques ne permettent ni d'anticiper l'apparition de la non-conformité ni de remonter aux composants défaillants incriminés face à l'occurrence de cette non-conformité.

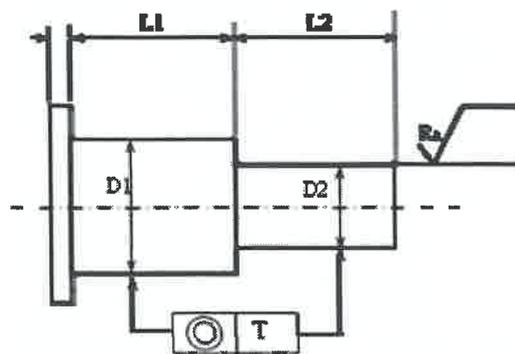


Figure 3. Dessin de définition de la pièce mécanique.

Nous nous intéressons au développement d'une démarche qui consiste à établir une politique de maintenance prévisionnelle basée sur le suivi des caractéristiques définissant la qualité du produit. Pour illustrer les différentes étapes de la démarche, nous déployons un

exemple pédagogique consistant en l'usinage d'une pièce mécanique de révolution dont le dessin de définition est donné dans la figure 3.

| Phase | Opération | Machine | Caractéristiques de l'opération |
|----------|-----------------------------------|------------------|--|
| Phase 10 | Découpe | Scie alternative | Montage de la pièce ; type de scie ; vitesse de découpe et d'avance. |
| Phase 20 | Tournage (chariotage et dressage) | Tour parallèle | Montage de la pièce et de l'outil ; type d'outil ; vitesse de coupe et d'avance ; profondeur de passe. |
| Phase 30 | Rectification | Rectifieuse | Montage de la pièce ; type de meule ; vitesse de coupe et d'avance ; profondeur de passe. |

Tableau 1 : Gamme de fabrication de la pièce mécanique.

Le dessin d'ensemble définit la description fonctionnelle du mécanisme à réaliser. Les dessins de définition de ses composants (pièces mécaniques) illustrent toutes les caractéristiques qu'il faut satisfaire lors de l'usinage des pièces. Pour la pièce qui nous concerne (figure 3), on établit la gamme de fabrication afin de définir les procédés de fabrication et la suite chronologique des opérations à réaliser. Le tableau 1 récapitule cette gamme de fabrication. La pièce est conçue pour répondre à des fonctionnalités qui sont définies dans le dessin d'ensemble, à savoir :

- ⇒ La fixation correcte de la pièce sur un support à travers le diamètre D1
- ⇒ Le montage correct d'un roulement sur le diamètre D2

Assurer ces fonctionnalités revient à respecter les spécifications techniques sur le dessin de définition à savoir :

- Les tolérances liées aux diamètres D1 et D2
- Les tolérances liées aux cotes L1 et L2
- La rugosité R_a
- La coaxialité

La première étape de la démarche consiste à traduire les fonctionnalités du produit en caractéristiques mesurables lors du contrôle qualité. La dérive de l'une de ces caractéristiques mesurables aura donc un impact sur les fonctionnalités du produit et altère donc sa qualité. On se limitera dans l'illustration de la démarche à l'étude de la caractéristique rugosité R_a . La dérive de cette caractéristique aura un impact sur la fonctionnalité du montage de roulement.

L'étape suivante consiste à lier chaque caractéristique mesurable sur le produit aux caractéristiques des opérations du processus. Dans le cas de la pièce mécanique, ce lien est établi à partir de la gamme d'usinage et du contrat de phase. La caractéristique rugosité est réalisée

lors de l'opération de rectification. Son lien avec les caractéristiques de cette opération est donné dans le tableau 2.

| Caractéristique mesurable sur le produit | Caractéristiques de l'opération rectification |
|--|---|
| La rugosité R_a | La vitesse de rotation de la meule La vitesse de rotation de la pièce La vitesse d'avance de la table L'équilibrage de la meule Les caractéristiques de la meule (type, grosseur de grains, diamètre, usure) L'arrosage Profondeur de passe |

Tableau 2 : Lien de la rugosité avec les caractéristiques de l'opération rectification.

En général, le couplage des caractéristiques des opérations aux caractéristiques du produit s'effectue à l'aide des coefficients de sensibilité évaluant l'impact de chaque caractéristique de l'opération sur les différentes caractéristiques du produit. Dans notre cas, les paramètres vitesse de rotation de la meule, vitesse de rotation de la pièce, vitesse d'avance de la table, l'arrosage du lubrifiant ainsi que la profondeur de passe sont réglés sur la machine en fonction de la rugosité souhaitée. La seule caractéristique qui peut présenter une dérive qui influence la valeur de la rugosité est l'usure de la meule.

Il est difficile de mesurer en continue l'usure de la meule pour garantir une intervention au moment où l'usure atteint des limites intolérables au delà desquelles la rugosité des pièces fabriquées est altérée. Nous proposons de projeter cette mesure sur la pièce fabriquée en suivant sa rugosité à l'aide de la carte de contrôle. Celle-ci nous renseignera alors sur l'état de l'usure de la meule. En effet, une dérive sur la rugosité traduit une dérive sur l'usure de la meule.

La carte de contrôle de la figure 4 présente, à titre d'illustration, une tendance ascendante de la rugosité. Par extrapolation de cette tendance, on essaye de déterminer l'instant T où cette caractéristique atteindra la limite admissible de contrôle supérieure. Grâce aux liens de cause à effet supposés établis entre la rugosité et l'usure de la meule d'une part et l'extrapolation faite sur la carte de contrôle d'autre part, une action de maintenance doit être anticipée en t_6 sur la meule avant l'instant T.

On élabore ainsi une politique de maintenance prévisionnelle basée sur le suivi des caractéristiques mesurables sur le produit et non nécessairement sur le suivi des caractéristiques des équipements.

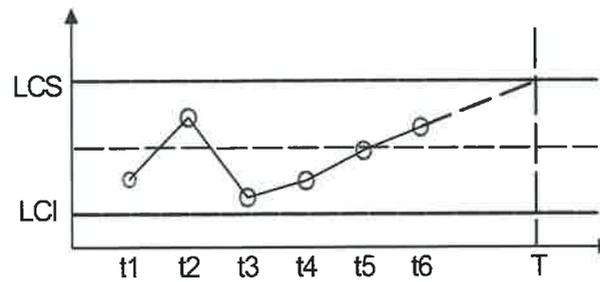


Figure 4 : Carte de contrôle de la rugosité R_a .

4. Application sur des cas industriels

Nous déployons la démarche illustrée plus haut dans le cadre de deux entreprises industrielles (fabrication de meubles en bois de chêne et fabrication de sacs d'emballage). L'objectif ici est d'illustrer les fondements nécessaires pour le développement de la méthode à savoir la définition des caractéristiques et la mise en exergue des relations de causes à effets.

4.1 Fabrication de meubles en bois de chêne

Dans l'entreprise de fabrication des meubles en bois de chêne étudiée, la ligne de production des tables pose problème. Les clients se plaignent de l'instabilité des tables dont les effets sont clairement perceptibles. Nous n'avons cependant aucune information quant à la façon dont se manifestent les défaillances qui sont responsables de cette non-conformité. Le premier défi posé est de savoir comment remonter jusqu'à la source du problème.

Pour ce faire, nous avons élaboré une démarche basée sur l'intégration des différents outils d'analyse des modes de défaillances (AMDEC Processus), des plans de contrôle d'équipement et des matrices de caractéristiques technologiques. En les combinant judicieusement, nous avons mis en évidence les liens entre les caractéristiques fonctionnelles, les étapes d'élaboration d'un produit et l'équipement utilisé. La synthèse de cette démarche appliquée à notre exemple est résumée dans la matrice des caractéristiques technologiques appliquée à la production de tables en chêne, présentée dans le tableau 3.

Dans l'atelier dédié aux produits réalisés en chêne, les modes opératoires sont composés des étapes suivantes : inspection de la qualité du bois, mise à dimension, dégauchissage, traçage, façonnage, assemblage, finition et traitement. Chacune de ces étapes est composée de plusieurs opérations répertoriées dans la matrice des caractéristiques technologiques sous la dénomination Code. A chaque opération est associée une caractéristique. Par exemple, dans le cas du façonnage, la solidité de l'assemblage est une caractéristique permettant de déterminer si

l'opération s'est correctement déroulée ou non. Cette caractéristique de l'opération peut avoir un impact sur l'une des caractéristiques fonctionnelles de la table (fleur du bois, densité de défauts, dimensions, stabilité, rugosité). Dans le cas de la solidité de l'assemblage, la caractéristique fonctionnelle de la table étant influencée est sa stabilité (sensibilité estimée à 5).

| Technology | | 100,00 | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------------|---------|------------|-----------|----------|-------|-------|
| Technologie | | Chêne | | | | Table | | | | | | |
| Technocode | | Table | | | | Fleur du bois | Défauts | Dimensions | Stabilité | Rugosité | Table | |
| BuildingBlock Characteristics >> | | | | | | Technology Detection | 48,00 | 56,00 | 40,00 | 48,00 | 40,00 | 48,00 |
| Code | Process Characteristic | Risk Assessment | Technology Sensitivity | DCP Occurrence | DCP Detection + Penalty | | | | | | | |
| Inspection | Elimination des nœuds et/ou fissures | | 5,80 | | 3 | 6 | 7 | | 4 | | 5,80 | |
| Identification des nœuds et fissures | | | | | | | | | | | | |
| | Fibres du bois | 48,89 | 4,07 | 5 | 2 | 6 | 6 | 1 | 1 | 3 | 4,07 | |
| | Surface du bois | 48,48 | 3,87 | 5 | 2 | 6 | 6 | 1 | 1 | 1 | 3,87 | |
| Mise à dimension des bois bruts | | | | | | | | | | | | |
| | Fibres du bois | 43,27 | 3,61 | 5 | 2 | 1 | | 5 | 1 | 5 | 3,61 | |
| | Surface du bois | 38,34 | 3,28 | 5 | 2 | 1 | | 5 | 1 | 4 | 3,28 | |
| Dégauchissage du bois | | | | | | | | | | | | |
| | | | 4,12 | | 3 | | | 5 | 3 | | 4,12 | |
| Travail de tous les éléments | | | | | | | | | | | | |
| | Tenons-mortaises | | 5,00 | | 4 | | | | 6 | | 5,00 | |
| | Rainures | | 3,00 | | 2 | | 3 | | | | 3,00 | |
| | Moulures | | 3,00 | | 2 | | 3 | | | | 3,00 | |
| Façonnage | | | | | | | | | | | | |
| | Collage | | 5,00 | | 2 | | | | 5 | | 5,00 | |
| | Presse | | 5,00 | | 3 | | | | 5 | | 5,00 | |
| | Sûreté | 72,00 | 5,00 | | 3 | | | | 6 | | 5,00 | |
| Assemblage | | | | | | | | | | | | |
| | Ponçage | 28,53 | 3,32 | 3 | 2 | 4 | 1 | | | 4 | 3,32 | |
| | Fleur du bois | 21,17 | 2,65 | 4 | 2 | 4 | 1 | | | 2 | 2,65 | |
| Finition | | | | | | | | | | | | |
| | Vernissage | | 3,74 | | 2 | 4 | 5 | | | 1 | 3,74 | |
| | Trempage | | 2,94 | | 2 | 4 | 3 | | | 1 | 2,94 | |
| | Teintage | | 3,74 | | 2 | 4 | 5 | | | 1 | 3,74 | |
| | Cirage | | 3,74 | | 2 | 4 | 5 | | | 1 | 3,74 | |
| Traitement | | | | | | | | | | | | |

Tableau 3 : Matrice des caractéristiques technologies appliquée à la production de tables en chêne.

C'est ainsi que, pour chaque opération, nous couplons les caractéristiques de l'opération aux caractéristiques fonctionnelles de la table à l'aide de coefficients de sensibilité. Grâce à ces coefficients de sensibilité, nous savons à présent où peuvent se manifester les défaillances. La stabilité dépend fortement des opérations d'élaboration des tenons et mortaises et de l'assemblage. Nous sommes donc tentés d'initier un plan d'amélioration de la maîtrise de ces opérations et augmenter le nombre de tests sur les tenons et mortaises. Toutefois, un meilleur contrôle de l'équipement nous donnera les atouts nécessaires pour éviter ces tests superflus. Mieux nous contrôlerons nos machines, plus nous réduirons les tests. En effet, chacune des caractéristiques des opérations précédemment décrites peut présenter plusieurs modes de défaillance. Nous avons construit trois plans de contrôle :

- ⇒ un plan de contrôle orienté Sciage ;
- ⇒ un plan de contrôle orienté Ponçage ;
- ⇒ un plan de contrôle orienté Assemblage.

L'opération de sciage est partiellement mise en cause dans l'instabilité des tables produites. Nous la présentons (tableau 4) afin d'illustrer la démarche de conception du plan de contrôle dynamique.

Dans ce plan de contrôle dynamique, nous avons recensé deux modes de défaillance : l'arrachement des fibres du bois et les brûlures du bois pouvant être occasionnés durant le sciage (ou le dégauchissage ou le façonnage). Ces modes de défaillance sont liés à quatre caractéristiques d'équipement et de matériaux : la vitesse de rotation de la lame, le type de dents de la lame, le type de bois et la surcharge de la scie circulaire. Nous quantifions ces relations à l'aide des coefficients de sensibilité. Nous relierons ensuite ces caractéristiques d'équipement et de matériaux aux différentes parties de l'équipement lui-même. Le plan de contrôle dynamique fait apparaître un facteur de risque plus élevé dans le cas de brûlures du bois. C'est donc cette défaillance qui doit être combattue en priorité. L'expérience nous a souvent montré que les fibres du bois peuvent être brûlées lorsque la scie circulaire est en surcharge. Cela se traduit, dans le plan de contrôle, par un coefficient de sensibilité élevé entre ce mode de défaillance et la caractéristique de surcharge. D'après ce même plan de contrôle, la surcharge dépend de l'état de la lame. En effet, la surcharge se produit lorsque la lame a des dents cassées. L'opération de sciage doit alors s'effectuer plusieurs fois aux mêmes endroits et plus longtemps. Par conséquent, les fibres du bois brûlent plus facilement.

| Process control | | freq | Process | SubStep | Process characteristics | Failure Mode | Comment | Det | Sev | Occ | RPN | Vitesse de rotation de la lame | Type de lame (dents) | Type de bois | Epaisseur (surcharge) |
|------------------------|-------------------|------------------|---------------------|--------------|-------------------------------|-----------------|---------|-----|-----|-----|-----|--------------------------------|----------------------|--------------|-----------------------|
| Inspection visuelle | Après toute coupe | | Sciage | | Séparation des fibres du bois | Arrachement | | 2 | 4 | 6 | 48 | 3 | 2 | 5 | 3 |
| Inspection visuelle | Après toute coupe | | Dégauchissage | | Séparation des fibres du bois | Brûlure du bois | | 2 | 6 | 6 | 72 | 3 | 2 | 5 | 5 |
| | | | Façonnage | | | | | | | 1 | 0 | | | | |
| | | | | | | | | | | 1 | 0 | | | | |
| Eq. Mat. Proc. Control | freq | Equipment | Part | L1 Cause | L2 Cause | L3 Cause | Occ | | | | | | | | |
| | | Moteur | Enroulements | Cour-circuit | | | 2 | | | 6 | | | | | 6 |
| | | | Roulements à billes | Usure | | | 3 | | | 6 | | | | | 6 |
| | | | Contrôles | Usure | | | 2 | | | 4 | | | | | 4 |
| | | Transmission | | Usure | | | 3 | | | 7 | | 6 | 3 | 7 | |
| | | Élément de coupe | Lame | Usure | | | 4 | | | | | | | | |

Tableau 4 : Plan de contrôle dynamique appliqué au procédé de sciage.

Il faut donc effectuer un contrôle fréquent sur les lames et les remplacer dès qu'elles montrent des signes d'usure avancée. Nous pouvons également rechercher des lames plus résistantes, peut-être plus coûteuses mais cela nous permettrait d'augmenter la disponibilité de l'équipement. A travers cet exemple, nous avons montré comment utiliser la démarche proposée pour déterminer les composants d'équipement à incriminer face à une occurrence de non conformité du produit fabriqué et n'étant pas sous contrôle. C'est ce lien de cause à effet que nous essayons d'exploiter pour élaborer une maintenance prévisionnelle du composant incriminé en suivant la dérive de la caractéristique mesurable sur le produit.

4.2 Fabrication de sacs de ciment.

Le processus étudié consiste à produire des sacs de papier d'emballage multi parois (sac de ciment) avec une cadence maximale de 250 sacs/mn. Ce processus est illustré dans la figure 5. Il est composé d'une tubeuse et d'une bottomeuse. La tubeuse transforme le papier en parois multiples et le découpe à des longueurs prééglées. Le sac est ensuite placé devant la bottomeuse pour la fermeture (pliage et collage) et l'impression.

Les cimentiers sont de plus en plus exigeants quant à la qualité des sacs, non seulement du fait des cadences plus élevées sur les lignes de remplissage, mais aussi du fait des manutentions multiples et intensives que subit le sac. Optimiser la productivité d'une ligne de remplissage exige un processus à la fois rapide et sûr. Le sac doit alors répondre à un certain nombre de fonctionnalités, sinon il est considéré non-conforme et donc rejeté lors de la réception de la commande ou éjecté lors du processus du remplissage.

Les défauts qui altèrent les fonctionnalités du sac sont recensés lors du contrôle de qualité. Ces défauts sont au nombre de huit. Si l'un des défauts est détecté, le sac est déclaré non conforme. Comme il s'agit d'un processus complexe, nous n'avons aucune information quant à la manière dont les défauts se manifestent. Notre premier objectif alors est d'être capable de remonter aux composants de l'équipement responsables de toute non-conformité observée sur le sac. Pour ce faire nous avons adopté une démarche basée sur une intégration d'outils standards de la qualité (Pareto, Brainstorming, diagramme d'Ishikawa, vote pondéré). Cette démarche repose sur une logique inspirée des méthodes de résolution de problèmes qui à partir d'un problème donné, essayent de remonter aux causes racines et proposent les solutions adéquates.

La première étape consiste à collecter toutes les données concernant les défauts recensés sur les sacs, survenus durant une période d'un mois. Une analyse Pareto nous a permis d'identifier trois défauts dominants : bande décalée, sac non ouvert et ouverture de la valve.

Par la suite nous avons opéré un « Brainstorming » qui a permis de lister, grâce à une réflexion individuelle et collective, toutes les causes possibles de chaque défaut dominant préalablement identifié. Dans le cas de l'ouverture de la valve, les causes possibles de ce défaut ainsi recensées sont :

1. Colle et /ou poussière sur les cylindres de pliage.
2. Mauvaise qualité du papier : humidité, grammage, état de surface.
3. Courroies lisses : glissement.
4. Usure de la lame.
5. Galets de tirage usés.
6. Manque de colle sur le sac.

7. Réglage du couteau.
8. Tension des courroies.
9. Mauvais réglage du couteau des manchettes.
10. Manque ou mauvais nettoyage des chariots.
11. Mauvais réglage des pinces.
12. Courroies mal tendues.
13. Fatigue des ressorts.
14. Mauvais réglage du débit de la colle.
15. Grande vitesse de rotation.
16. Manque de gammes opératoires.
17. Opérateurs non formés.

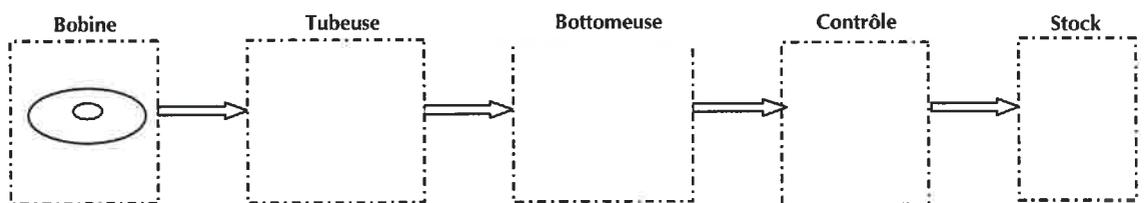


Figure 5 : Processus de fabrication de sacs de ciment.

Nous procédons par la suite à une analyse de ces causes à l'aide d'un diagramme d'Ishikawa qui va nous permettre de représenter et de classer toutes les causes émises lors du brainstorming selon la démarche des 5M (Méthodes, Main d'œuvre, Machine, Milieu, Matière) et de faire apparaître la contribution de chaque cause à la production du défaut considéré, figure 6.

L'étape suivante consiste à identifier les causes racines qui ont une influence directe sur l'apparition du défaut à partir de toutes les causes proposées. Pour ce faire, nous avons réalisé un vote pondéré auprès des responsables de la ligne de production qui ont attribué, à chaque cause, un score de 1 à 3 pour renseigner son degré d'influence sur le défaut considéré.

C'est ainsi que pour chaque défaut dominant, on identifie les causes racines responsables de cette non-conformité. En ce qui concerne le défaut ouverture de la valve, les résultats du vote permettent de dégager deux causes racines : l'usure de la lame et l'usure de la courroie. A ce stade, nous avons établi le lien de cause à effet entre une caractéristique produit (ouverture de la valve) et les caractéristiques machines (usure de la lame et usure de la courroie). Donc une

dérive sur la caractéristique produit, ouverture de la valve, traduit une dérive sur l'usure de la lame et de la courroie.

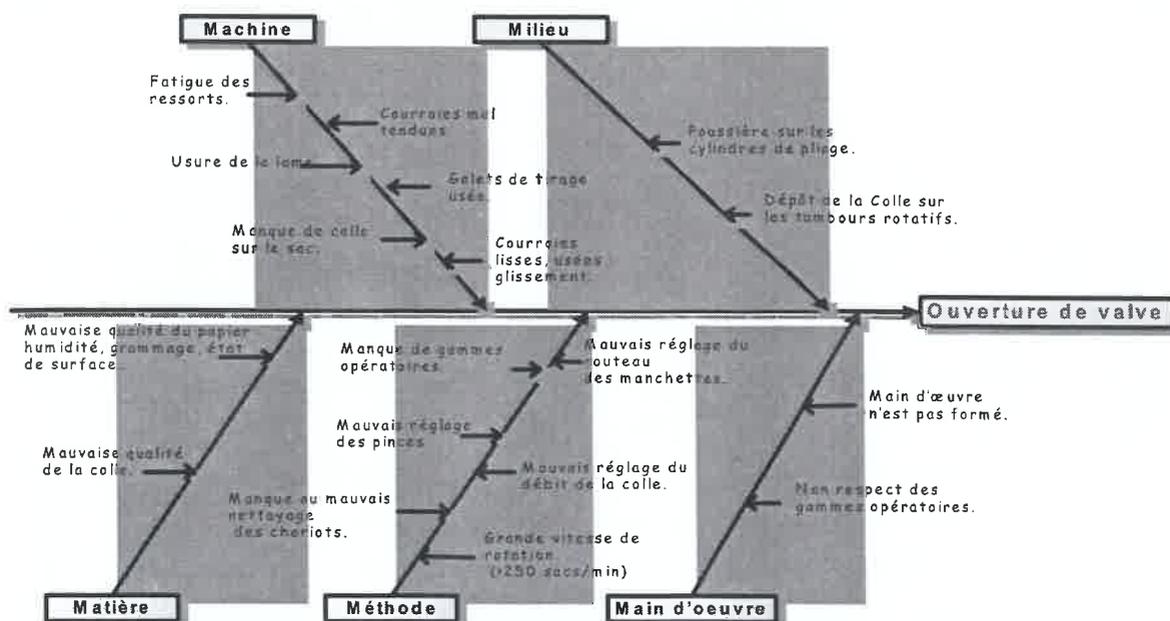


Figure 6 : Diagramme d'Ishikawa pour l'ouverture de valve.

Comme il est difficile de mesurer l'usure de la lame et de la courroie pour procéder à une intervention à temps, nous pensons qu'une maintenance prévisionnelle basée sur le suivi des mesures de la dégradation de la qualité du sac est une alternative intéressante à investiguer.

Ces résultats encourageants dégagés dans les différents exemples traités motivent notre intérêt à traiter la problématique consistant à élaborer une maintenance prévisionnelle basée sur le suivi des mesures des caractéristiques produit. A travers ces exemples, nous avons pu établir, dans un premier temps, le lien de cause à effet entre les caractéristiques produit et les composants machine incriminés. Nous projetons, pour la suite de ce travail de recherche, de répondre à des questions relatives à cette problématique à savoir :

- ⇒ Comment formaliser le lien de cause à effet entre les caractéristiques mesurables sur le produit et les composants des équipements du processus d'élaboration ?
- ⇒ Comment la dégradation d'un ou plusieurs composants de l'équipement influence-t-elle sur la dérive observée sur la caractéristique produit ?

5. Discussions et perspectives

L'objet de ce travail est de répondre à des interrogations relatives à la manière d'améliorer la qualité des produits fabriqués à l'aide d'une maintenance efficacement organisée et gérée en

intégrant des aspects de mesure et contrôle. La problématique que nous essayons d'éclairer est de savoir si il est possible d'élaborer une politique de maintenance prévisionnelle non pas sur la base du suivi des caractéristiques machines, mais plutôt sur le suivi et le contrôle des caractéristiques des produits fabriqués.

La première étape de cette recherche a consisté à établir le lien de cause à effet entre les caractéristiques mesurables sur le produit et définissant sa qualité et les composants de l'équipement permettant sa fabrication. Une fois ce lien établi, le suivi de la caractéristique mesurable sur le produit permettra de renseigner sur l'état de dégradation de l'équipement. Il serait alors possible d'élaborer une maintenance prévisionnelle du composant de l'équipement en extrapolant les résultats du suivi de la caractéristique produit. Nous avons illustré cette démarche sur des exemples ce qui nous a permis de souligner un certain nombre de verrous et de questions scientifiques qu'il faudra lever :

- ⇒ Est-il facile de deviner automatiquement un profil de dégradation pour les équipements à partir de l'établissement d'un profil de dégradation de la qualité du produit fabriqué ?
- ⇒ La dégradation de l'équipement suit-elle la même tendance que la dérive observée sur la caractéristique produit ?
- ⇒ Y a-t-il un effet d'inertie qui introduira un décalage entre les manifestations de dysfonctionnement des équipements et l'observation de leurs conséquences sur les produits ?
- ⇒ Si deux composants ou plus sont incriminés face à une occurrence de non-conformité, comment les effets conjugués de la dégradation de ces composants influencent-ils la dérive de la caractéristique produit ?

Développer une approche instrumentalisée permettant l'élaboration de ce type de maintenance constituera une contribution non négligeable. Toutefois, la maintenance prévisionnelle ne se substitue pas à des méthodes de gestion plus traditionnelles, elle est en fait un enrichissement des programmes de maintenance et elle ne pourra en aucun cas supprimer totalement la maintenance corrective.

6. Bibliographie

- Al-Najjar B., Alsyouf I., 2000. Improving effectiveness of manufacturing systems using total quality maintenance. *Integrated Manufacturing Systems*, 11, pp. 267-276, 2000.
- Alsyouf I., 2007. The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. *International Journal of Production Economics*, Volume 105, Issue, 1, January 2007, Pages 70-78

- Carnero M.C, 2004. The control of the setting up of a predictive maintenance programme using a system of indicators. *Omega*, Volume 32, Issue 1, February 2004, Pages 57-75.
- Carnero M.C, 2005. Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study. *Decision Support Systems*, Volume 38, Issue 4, January 2005, Pages 539-555
- Gupta D., Günalay Y., Srinivasan M., 2001. The relationship between preventive maintenance and manufacturing system performance. *European Journal of Operational Research*, 132, pp. 146-162, 2001.
- Hongzhou W., 2002. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139, pp. 469-489, 2002.
- Kutucuoglu, K., Hamali, J., Irani, Z., Sharp, J., 2001., A framework for managing maintenance using performance measurement systems. *International Journal of Operations and Production Management*, 2001, 21 (1/2), 173-194.
- Leger J.B., 1999. Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes industriels de production : proposition d'un cadre formel de modélisation. Thèse soutenue en 1999. Université de Nancy 1, Nancy, France.
- McKone K, Weiss E, 2002. Guidelines for implementing predictive maintenance. *Production and Operations Management*, 2002, 11(2):109-124.
- Waeyenbergh G, Pintelon L, 2004. Maintenance concept development: a case study. *International Journal of Production Economics*, Volume 89, Issue 3, 18 June 2004, Pages 395-405