

Thèse de doctorat

*Thèse présentée à la Faculté Polytechnique de Mons
pour l'obtention du grade de*

Docteur en Sciences de l'Ingénieur

soutenue par
Christophe LETOT

**Maintenance prévisionnelle d'équipements
industriels basée sur la modélisation, l'estimation
et la simulation de lois de dégradation**

Composition du jury :

<i>Président :</i>	Prof. Marc PIRLOT	UMONS
<i>Promoteur :</i>	Prof. Pierre DEHOMBREUX	UMONS
<i>Secrétaire :</i>	Prof. Olivier VERLINDEN	UMONS
<i>Membres :</i>	Prof. Pierre-Étienne LABEAU	ULB
	Prof. Liliane PINTELON	KU Leuven
	Prof. Fouad RIANE	FST de Settat
	Prof. Édouard RIVIÈRE-LORPHÈVRE	UMONS
	Prof. Roger SERRA	ENI du Val de Loire

10 décembre 2013

Thèse préparée au sein du service de Génie Mécanique

Pour obtenir le document intégral, veuillez me contacter par mail à l'adresse christophe.letot@umons.ac.be

Introduction

CONTEXTE DE LA THÈSE

Cette thèse s'inscrit dans le contexte des modèles de fiabilité prévisionnelle basés sur des données de dégradation en vue d'optimiser la maintenance d'équipements industriels. D'un point de vue historique, la dégradation fut d'abord prise en compte à l'aide de lois empiriques utilisées pour le dimensionnement et la conception d'équipements mécaniques soumis à des sollicitations. Il arrivait malheureusement qu'un équipement subisse une avarie bien avant la fin de sa mission. L'expérience montra dès lors que ces modèles évolutifs de dégradation étaient soumis à de nombreuses incertitudes et l'accumulation des temps de défaillance a alors permis de dresser des profils de fiabilité générique pour des classes d'équipements fréquemment utilisés comme les roulements à billes. Par la suite, grâce aux développements de capteurs de plus en plus performants et à l'aide de système d'acquisition et de logiciel adaptés, une nouvelle source de données est devenue disponible à savoir la mesure d'indicateurs indirects de dégradation (vibration, température, puissance consommée)... Cette nouvelle mesure de la dégradation en exploitation permet de suivre chaque équipement et de détecter des anomalies par rapport à l'évolution planifiée de la dégradation. L'objectif poursuivi à l'aide de ces modèles et de ces mesures est de parvenir à obtenir la durée de vie résiduelle propre à chaque équipement. A l'heure actuelle, cette problématique fait l'objet de nombreux développements qui contribuent à développer des modèles de maintenance intelligente permettant de réduire les coûts de maintenance et d'augmenter la disponibilité des équipements. C'est pourquoi le groupe de recherche en fiabilité et maintenance des équipements mécaniques du service de Génie Mécanique de l'UMONS s'investit dans cette thématique. Afin d'obtenir cette durée de vie résiduelle, trois approches ont été identifiées, celles-ci se distinguent par la nature des données utilisées et par leur situation temporelle par rapport à la durée d'utilisation de l'équipement :

1. l'étape de conception (avant) : la première approche consiste à comprendre et modéliser les mécanismes physico-chimiques de dégradation menant à la défaillance dans des conditions données. Ces modèles permettent alors d'estimer une durée de vie attendue en fonction des sollicitations imposées ;
2. la phase d'exploitation (pendant) : la deuxième méthode consiste à définir des indicateurs mesurables de performance de la machine et d'établir un diagnos-

- tic par rapport à des valeurs seuils à déterminer (*condition monitoring*). Le suivi de ces indicateurs permet également de détecter des dérives suite à une perturbation des paramètres du processus ou suite à une perturbation extérieure ;
- la collecte de données post-défaillances (après) : la troisième approche consiste à réaliser une étude statistique sur les temps d'arrêts relevés en fin de vie de l'équipement.

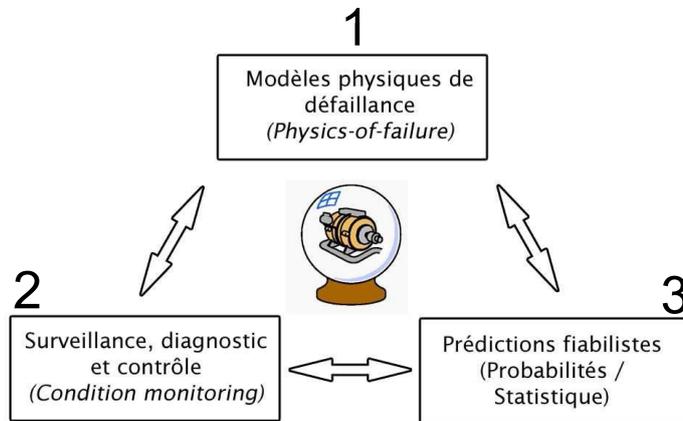


FIGURE 1 – les trois approches pour l'obtention des temps de défaillance [1].

La figure 1 présente ces trois approches permettant d'établir des modèles de fiabilité sur base d'événements (temps de défaillance ou temps d'atteinte d'un seuil de dégradation).

La première approche requiert de nombreux développements et essais expérimentaux pour parvenir à identifier une loi qui régit le processus de dégradation. Les modèles physiques de défaillance prennent souvent en compte les variables d'influence qui vont modifier l'évolution de la dégradation (contrainte, température, pression, ...) et s'adaptent donc facilement au changement de conditions de fonctionnement. Elle est principalement utilisée en phase de conception d'un équipement afin de garantir que ce dernier puisse accomplir sa mission pour des conditions de fonctionnement connues. Par ailleurs, elle permet également d'obtenir la durée de vie résiduelle spécifique en temps réel à condition que l'on puisse mesurer le niveau de dégradation ; le pronostic étant simplement réalisé en extrapolant la loi paramétrique du processus de dégradation.

La deuxième approche nécessite un investissement en matériel conséquent (capteur, système d'acquisition, logiciel, ...) mais permet de définir des seuils sur les variables du processus permettant la plupart du temps d'anticiper la défaillance menant à la ruine de l'équipement. Cette approche permet d'obtenir la durée de vie résiduelle si des algorithmes de pronostic sont mis en place afin de prédire l'évolution future de l'indicateur de dégradation.

La troisième approche, simple à mettre en oeuvre, nécessite un grand nombre de temps de défaillance et sera donc utilisée pour des équipements amenés à être remplacés après le constat de la défaillance. Toutefois, elle ne permet pas d'obtenir la durée de vie résiduelle spécifique à un équipement en temps réel mais fournit un ordre de grandeur de la durée de vie du lot d'équipements.

L'étude approfondie de ces trois approches ainsi que celle de leur synergie nous a permis de cibler différents sujets pour des thèses de doctorat.

Une première thèse de doctorat portant sur la prise en compte de l'incertitude dans les modèles fiabilistes de maintenance industrielle a été présentée en 2007 par Olivier Basile [1]. Cette thèse était donc essentiellement consacrée à l'obtention de la fiabilité par la troisième approche. La principale limitation de cette dernière est qu'elle ne permet pas d'estimer la vie résiduelle d'un équipement spécifique. Finalement, cette thèse s'est concrétisée par l'élaboration d'une politique de maintenance préventive systématique optimisée qui tient compte de l'incertitude affectant les modèles de fiabilité du système. Cette étude a notamment montré l'intérêt pour le gestionnaire de maintenance de considérer et de tenter de réduire les incertitudes dans les prévisions des performances annoncées. Elle a également permis de prendre conscience de la difficulté de garantir un indicateur de performance (coût, disponibilité) en se basant uniquement sur une valeur moyenne et a donc mis en évidence l'intérêt des intervalles de confiance.

Une deuxième thèse de doctorat présentée en 2008 par Bovic Kilundu [2] s'est consacrée plus en détail à la deuxième approche dite du *condition monitoring*. Elle s'est ainsi intéressée à l'exploitation de mesures vibratoires en vue de la détection et du diagnostic. La question des indicateurs pertinents a été abordée et une démarche de prétraitement des signaux en vue du débruitage a été proposée. Elle a également contribué au développement d'approches de détection précoce de dégradations mécaniques et a développé plusieurs méthodes de diagnostic. Trois applications expérimentales ont été mises en oeuvre afin d'évaluer les performances de ces outils de diagnostic : la première concerne l'identification de défauts multiples de machines tournantes, la seconde est dédiée à la détection précoce de défauts superficiels de roulements et la troisième s'intéresse à la reconnaissance de l'usure d'outils de coupe.

Une autre thèse en cours de réalisation, faisant l'objet des travaux de recherche d'Arnaud Lesage, vise à établir des liens entre la fiabilité et la qualité [3]. L'objectif est d'évaluer les gains potentiels obtenus en réalisant une maintenance basée sur la qualité en fonction des différents paramètres du modèle (périodicité de maintenance systématique, périodicité d'inspections, taille de l'échantillon pour la mesure de la qualité, ...). Les données de qualité sont de trois types :

- les données qualités *process*, souvent des paramètres physiques, qui influent directement sur la qualité ;
- les données qualité *online* obtenues sur base d'inspections visuelles, capteurs lasers, etc. et permettant une mesure en temps réel de la qualité ;

- les données *offline* collectées sur base de tests réalisés avec un certain délai par rapport au processus.

Une dernière thèse menée par Guillaume Fleurquin a pour objectif d'intégrer la maintenance opportuniste dans les modèles de maintenance classique en prenant en compte la gestion des ressources humaines. L'objectif est de développer un modèle de maintenance (coût et disponibilité) tenant compte de l'historique du système (temps de panne, durée d'intervention, etc...), de lois physiques de défaillance ainsi que de temps d'arrêt qualifiés d'opportunistes (arrêts non planifiés, période de non production, ...). Un des critères utilisés pour la réalisation d'une maintenance opportuniste se base sur la durée de vie résiduelle. Par la suite, ce modèle intégrera des paramètres liés à la disponibilité des ressources humaines.

Ces différentes thèses s'articulent toutes autour d'une même thématique : la durée de vie résiduelle. En effet, la thèse d'Olivier Basile envisageait la durée de vie résiduelle moyenne obtenue à partir d'une étude statistique de temps de défaillance. L'approche développée par Bovic Kilundu permettrait à terme de détecter des défauts précoces à l'aide de l'analyse vibratoire et donc de pouvoir planifier le remplacement d'un équipement. La thèse d'Arnaud Lesage envisage la durée de vie résiduelle à partir du moment où une dérive d'une variable du processus a été détectée tandis que la thèse de Guillaume Fleurquin utilise cette durée de vie résiduelle comme critère de maintenance opportuniste. Voilà pourquoi cette notion de durée de vie résiduelle sera un des points importants étudiés au cours de cette thèse.

OBJECTIFS DE LA THÈSE

L'objectif principal de cette thèse est de proposer une stratégie de maintenance préventive, qualifiée d'adaptative, dont le temps d'intervention s'actualise en fonction de l'état de dégradation relevé lors d'inspections. Elle a en outre pour vocation de reposer le problème de l'estimation de la durée de vie résiduelle en tenant compte de l'information provenant des trois approches. En effet, le dénominateur commun de celles-ci est qu'elles permettent d'obtenir une loi de fiabilité soit sur base de temps d'arrêt soit sur base de temps d'atteinte d'un seuil de dégradation. Cette loi de fiabilité est ensuite utilisée pour calculer la durée de vie résiduelle.

La première originalité concerne la méthodologie récursive permettant l'obtention de modèles de fiabilité spécifique grâce à la mesure d'indicateurs de dégradation ou en prenant en considération le processus de dégradation dans l'expression de la loi de fiabilité. Le modèle de fiabilité prévisionnelle s'actualise ainsi à chaque nouvelle donnée enregistrée ce qui permet d'estimer le temps restant avant que l'indicateur surveillé n'atteigne un seuil correspondant à la défaillance d'un équipement particulier.

La seconde originalité concerne l'établissement d'un modèle de maintenance adaptative. Puisque le modèle de fiabilité et de durée de vie résiduelle s'actualise en temps réel, il est possible de mettre à jour également le temps d'intervention optimal qui permettra d'anticiper la défaillance de l'équipement. Plus particulièrement, nous proposons un critère simple qui aide le gestionnaire de maintenance à reporter ou non l'intervention sur un équipement en fonction de la dégradation mesurée et de paramètres de maintenance que sont le coût et l'indisponibilité.

De plus, afin de conserver les acquis de la thèse précédente [1], nous avons pris soin de conserver les atouts de l'approche fiabiliste qui se sont concrétisés par le développement d'un logiciel nommé "Reliabilitix" [4]. Autrement dit, les modèles que nous développons sont facilement transposables dans cet outil à la nuance près que nous estimons des temps d'atteinte d'un seuil de dégradation au lieu de temps de défaillance correspondant la plupart du temps à la ruine de l'équipement. L'estimation de durées de vie résiduelle par des modèles de dégradation nécessite donc de définir des seuils limites au-delà desquels l'équipement est considéré comme défaillant. Le terme "défaillant" n'est pas synonyme de rupture brutale dans ce type d'analyse mais correspond davantage à des critères d'acceptation en termes de performance, de qualité, de rentabilité... La définition de ces seuils est une étape critique qui va conditionner la validité du modèle. Ce seuil ne doit pas être sous-évalué sous peine d'avoir une durée de vie résiduelle estimée trop faible et inversement, ce seuil doit être sécuritaire vis-à-vis des critères d'acceptation.

Finalement, nous nous sommes efforcés d'identifier des mécanismes de dégradation fréquemment rencontrés dans le domaine de la production mécanique. Les thématiques abordées sont :

- la longévité des roulements à billes ayant comme mode de défaillance l'endommagement par fatigue superficielle ;
- la durée de vie d'éléments mécaniques (arbre de transmission, ailettes de turbomachine) soumis à la fissuration par fatigue ;
- la durée de vie d'outils de coupe soumis à l'usure lors du procédé d'enlèvement de matière par usinage.

Ces cas d'études correspondent à des thématiques de recherche et d'enseignement du service de Génie Mécanique, ce qui permet de lier ces domaines avec celui de la fiabilité et de la maintenance. Une grille de lecture reprenant les objectifs majeurs est présentée à l'annexe ??.

CONTENU DU TRAVAIL ET ORIGINALITÉS

Le rapport est constitué de 6 chapitres qui s'articulent autour des thématiques de dégradation mécaniques comme présenté à la figure 2. L'organisation du document se présente de la façon suivante :

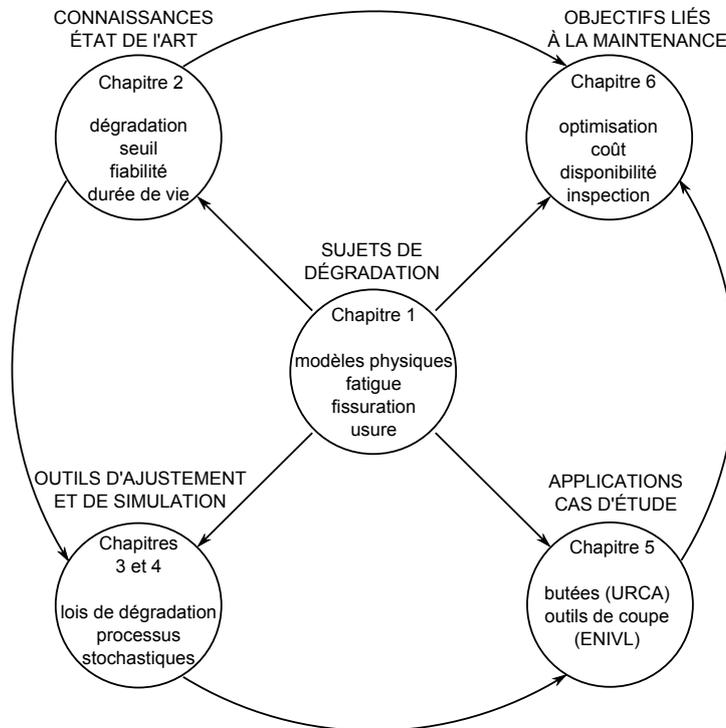


FIGURE 2 – Présentation des chapitres.

- Le premier chapitre a pour vocation de présenter les principaux exemples de dégradation mécanique abordés au cours de cette thèse. Nous précisons également les échanges scientifiques réalisés d'une part avec l'Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA) pour l'obtention de données de dégradation concernant des butées axiales et d'autre part avec l'École Nationale d'Ingénieurs Val de Loire (ENIVL) pour l'étude de l'usure des outils de coupe.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique de l'approche fiabiliste et des modèles de dégradation. Nous y rappelons les principaux outils mathématiques pour l'estimation statistique de la fiabilité. La durée de vie résiduelle est notamment abordée et illustrée sur les données d'usure d'outils de coupe. **Nous mettons ainsi en évidence l'intérêt d'avoir un modèle de vie résiduelle spécifique plutôt qu'un modèle général de durée de vie résiduelle moyenne.** Par la suite, nous établissons la classification des modèles de dégradation en présentant leurs avantages et inconvénients ainsi que leur

champ d'application. Cette analyse nous permet ainsi d'identifier les modèles qui sont développés dans la suite de ce travail.

- Le troisième chapitre reprend les premiers développements réalisés dans le cadre de la modélisation de la dégradation par des modèles physiques de défaillance. Des modèles de dégradation généraux y sont présentés dans un premier temps. Par la suite, des modèles physiques de dégradation pour représenter l'usure et la fissuration sont étudiés. **Une comparaison originale du modèle de Cox et des modèles de trajectoires a été établie sur des données d'usure d'outils de coupe.** Par ailleurs, nous avons proposé un modèle de fiabilité pour l'évolution de la fissuration qui prend en compte les paramètres de la loi de Paris-Erdogan et avons réalisé une étude de sensibilité sur le nombre de points nécessaires pour l'obtention de la vie résiduelle spécifique.
- Le quatrième chapitre aborde les processus stochastiques pour la représentation de trajectoires de dégradation diffusives. Les processus gamma et de Wiener ainsi que les processus de Markov sont étudiés plus spécifiquement. **Un ajustement original des processus gamma et de Wiener non stationnaires a été proposé.** Nous nous sommes ensuite intéressés au processus semi-Markov pour la modélisation d'un processus monotone à plusieurs états de dégradation. Nous avons ainsi repris un modèle présent dans la littérature et avons proposé une généralisation du modèle pour un nombre quelconque d'états. Ce modèle a ensuite été appliqué sur des données simulées de dégradation pour des roulements à billes d'une broche de fraiseuse afin de réaliser une étude de sensibilité sur le nombre d'états pris en compte et les performances de ce modèle.
- Le chapitre cinq présente deux cas d'étude réels. Le premier concerne l'usure des bagues de butées axiales tandis que le second cas envisage l'usure des outils de coupe en usinage. Les données pour ces cas d'étude ont été obtenues grâce à des collaborations scientifiques avec l'ENI Val de Loire et le GRESPI¹ de Reims (Université de Reims Champagne-Ardenne). **Pour ces deux études, nous avons mis en évidence l'intérêt de considérer simultanément des indicateurs de dégradation pour l'obtention de lois de fiabilité et de durées de vie résiduelles.**
- Le sixième et dernier chapitre synthétise la méthodologie permettant d'obtenir un modèle de fiabilité qui s'actualise avec l'apport de nouvelles données de dégradation. **Un modèle de maintenance adaptative y est également présenté ainsi qu'un critère permettant de reporter ou non le remplacement préventif de l'équipement compte tenu de la dégradation mesurée.**

Finalement, les apports et originalités seront résumés dans une conclusion générale et des pistes de recherche seront mises en évidence pour des travaux futurs.

La bibliographie et les annexes clôturent ce rapport de thèse.

1. Groupe de Recherche En Sciences Pour l'Ingénieur

Conclusion générale

Ce travail de recherche avait pour objectif d'apporter une contribution dans l'étude de lois de fiabilité basée sur la dégradation. Plus particulièrement, nous nous sommes focalisés sur des cas d'étude fréquemment rencontrés dans le milieu de la conception et de la production mécanique. Nous avons ainsi identifié trois approches essentielles pour le calcul de la fiabilité :

1. la modélisation physique des défaillances ;
2. le suivi d'indicateurs de dégradation ;
3. la fiabilité statistique.

Afin d'exploiter au mieux la durée de vie résiduelle spécifique d'un équipement, nous avons montré qu'il était important de tenir compte de l'information provenant de ces trois approches. Tout d'abord, la modélisation physique des défaillances utilisée en phase de conception permet de prédire l'évolution d'une dégradation selon une loi empirique pour laquelle des incertitudes sur les paramètres sont prises en compte. Par la suite, en phase d'exploitation, le suivi d'indicateurs de dégradation permet de détecter des anomalies par rapport à l'évolution prédite, signe manifeste d'une dérive soit au niveau des paramètres du processus qui régit le fonctionnement de l'équipement ou soit au niveau d'une perturbation extérieure. Finalement, lorsque ces équipements arrivent au terme de leur mission, la collecte des temps de fin de vie permet de construire une distribution statistique des temps de défaillance. Grâce à cette distribution et le retour d'expérience, des valeurs seuils sécuritaires peuvent alors être (re)déterminées soit sur la variable physique du processus de dégradation soit sur les différents indicateurs. Cette démarche permet de réduire les incertitudes sur la durée de vie résiduelle spécifique d'un équipement grâce à la collecte de nouvelles mesures de dégradation et à l'actualisation des modèles de fiabilité.

Le premier chapitre a présenté trois exemples emblématiques de dégradation rencontrée en mécanique. Ces trois cas sont l'écaillage des pistes de roulements des éléments de guidage en rotation, la fissuration par fatigue d'éléments de machine et l'usure des outils de coupe lors du procédé d'enlèvement de matière par usinage. Pour chacun de ces cas, nous avons présenté les modèles de conception utilisés qui tiennent compte de la modélisation physique des défaillances ; nous avons présenté des exemples d'indicateurs de dégradation et apporté une discussion sur la difficulté de réaliser une étude de fiabilité statistique.

Après avoir détaillé ces trois thématiques servant de fil rouge, le chapitre 2 avait un objectif bibliographique visant à réaliser l'inventaire des méthodes et outils qui permettent de prendre en compte des données de dégradation pour l'estimation d'un modèle de fiabilité prévisionnelle. Cette étude bibliographique nous a permis d'identifier les processus à premier temps d'atteinte d'un seuil. Nous avons détaillé les différents types de processus fréquemment rencontrés pour la modélisation des dégradations. Deux processus ont ainsi été retenus, les processus définis par un modèle empirique paramétrique dont la nature aléatoire intervient au niveau de ses paramètres et les processus stochastiques pour lesquels l'aléa intervient au cours de l'évolution dans le temps de ces processus.

Le troisième chapitre a présenté plus en détail les propriétés des processus à premier temps d'atteinte d'un seuil. L'exemple de la fissuration par fatigue a ensuite été présenté en utilisant la loi de Paris-Erdogan, les résultats ont montré que ce modèle présentait de grandes incertitudes lorsque les valeurs des données mesurées sont éloignées de la valeur du seuil limite de fissuration. Le deuxième exemple portait sur l'étude de l'usure en cratère de plaquettes d'usinage, une comparaison du processus à temps d'atteinte d'un seuil avec le modèle de Cox a été réalisée. Celle-ci a montré l'avantage des processus à temps d'atteinte d'un seuil pour des valeurs de variable d'influence (la vitesse de coupe) se situant au-delà des intervalles utilisés pour les covariables du modèle de Cox.

Les processus stochastiques ont été abordés dans le quatrième chapitre. Nous nous sommes intéressés aux processus de Wiener, gamma et de Markov. Nous avons montré que cette famille de processus est particulièrement bien adaptée pour l'actualisation de la loi de fiabilité en fonction de la dégradation mesurée. En effet, l'évolution future de ces processus ne dépend que de la dernière valeur mesurée et de plus des solutions analytiques existent pour l'obtention d'une loi de fiabilité paramétrique tenant compte de la valeur seuil. Nous avons en outre considéré ces processus pour des cas non stationnaires. Par la suite, nous nous sommes intéressés aux processus de Markov. Nous avons adapté un modèle semi-Markov de la littérature pour envisager le cas d'équipements amenés à fonctionner sous différentes sollicitations. L'intérêt de ce modèle est qu'il peut être utilisé en phase de conception d'un équipement pour évaluer la probabilité que ce dernier puisse remplir sa mission compte tenu des paramètres fixés mais également en phase d'exploitation lorsque les conditions de fonctionnement changent afin de mettre à jour la durée de vie résiduelle.

Dans le cinquième chapitre, nous avons adapté les différents modèles de dégradation sur des données provenant d'essais expérimentaux d'une part sur des butées axiales et d'autre part sur des plaquettes d'usinage. Les résultats ont confirmé l'intérêt de tenir compte des données provenant des trois approches (fiabilité statistique sur base des temps d'arrêt des essais, surveillance d'un indicateur de dégradation, mesure du défaut). Concernant l'usure des outils de coupe, nous avons opté pour un modèle de dégradation non paramétrique basé sur la distribution de l'usure pour chaque temps d'inspection. La distribution statistique des temps d'atteinte du seuil d'usure est donc nécessaire afin d'y reporter le quantile correspondant à chaque plaquette. Pour l'indicateur de dégradation, le suivi de la puissance permet également de prédire le temps d'atteinte du seuil d'usure avec une précision de

l'ordre de la minute. Dans le cas des butées axiales, le suivi de l'indicateur de vibration permet de détecter le commencement d'un mode de fonctionnement dégradé qui correspond à l'apparition du défaut d'écaillage. Par la suite, un modèle physique d'évolution de ce défaut permet d'anticiper le temps de dépassement d'une valeur seuil fixée.

Le sixième et dernier chapitre fut consacré à l'optimisation de la maintenance du point de vue des coûts et de la disponibilité. La méthode retenue est celle basée sur la fiabilité. L'originalité a été mise en évidence en proposant un modèle de maintenance adaptative qui s'actualise à chaque nouvelle mesure de dégradation. Nous avons en outre discuté de l'intérêt de reporter l'action de maintenance préventive en proposant un critère de coûts et de disponibilité afin d'apporter une aide à la décision sur le choix de la meilleure stratégie. Après avoir réalisé une étude de sensibilité des différents paramètres, nous proposons également une équation permettant de connaître la valeur limite des coûts d'inspection au delà de laquelle la maintenance adaptative est moins intéressante qu'une maintenance préventive systématique. Nous avons conclu ce chapitre en utilisant cette stratégie de maintenance sur les plaquettes d'usinage ainsi que sur un exemple numérique provenant de la littérature, les résultats ont confirmé la nécessité que les coûts d'inspection soient faibles pour que cette approche soit rentable.

PERSPECTIVES

Au terme de ce travail, nous proposons une méthodologie permettant d'obtenir une loi de fiabilité qui s'actualise avec de nouvelles données ainsi qu'une stratégie de maintenance adaptative permettant d'exploiter au mieux la durée de vie résiduelle d'un équipement. Toutefois, certaines pistes d'amélioration peuvent être envisagées :

1. Une difficulté inhérente à cette approche concerne la définition des seuils limites sur les indicateurs de dégradation ainsi que sur la dégradation elle-même. Comment parvenir à définir cette valeur seuil ? Sur base de quel critère ? La plupart du temps ce seuil est fixé au cas par cas soit sur base d'une norme spécifique (exemple de l'usure en dépouille) soit sur base de retour d'expérience en corrélant des temps de panne à des valeurs de dégradation mesurées aux derniers instants de fonctionnement. Toutefois, un seuil déterministe peut s'avérer trop restrictif dans la mesure où tous les équipements peuvent ne pas forcément être considérés comme étant "en panne" dès lors que ce seuil est dépassé. Les modèles existants pourraient être améliorés en considérant soit par exemple une valeur seuil limite inférieure et une valeur seuil limite supérieure définissant ainsi une zone floue pour laquelle on considère que l'équipement est encore apte à remplir sa mission mais est dans un état avancé de dégradation. Ces valeurs limites seraient définies par des experts et en appliquant la logique possibiliste afin de tenir compte du niveau de certitude sur la valeur de ces seuils. Une deuxième solution serait de considérer une distribution statistique du seuil limite plutôt qu'une valeur déterministe.

2. Concernant l'étude des processus stochastiques, le fait de ne tenir compte que de la dernière valeur mesurée pour l'évolution future peut s'avérer limitatif surtout lorsque le taux de dégradation varie fortement [5]. Deux pistes sont à envisager : la première consiste à améliorer les processus stochastiques tels que Wiener et gamma afin qu'ils prennent en compte l'historique des valeurs antérieures à la dernière valeur mesurée [6] ; la deuxième serait de combiner ces processus stochastiques avec des outils de détection de dérive afin de pouvoir détecter des instants de changement de mode significatif et de réestimer le processus stochastique en ces temps.
3. Du point de vue de l'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité, l'approche que nous proposons nécessite de réaliser des inspections sur l'équipement. Nous avons montré l'importance du temps de la première inspection et commenté l'influence du nombre d'inspections en fonction des coûts et de l'indisponibilité qu'elles engendrent. Un apport intéressant serait de combiner cette stratégie de maintenance adaptative à une stratégie de maintenance opportuniste dans le cas de systèmes complexes. Le principe serait de profiter d'un arrêt du système (planifié ou non) pour réaliser des inspections en temps masqué sur les différents équipements qui le constituent.
4. Par ailleurs, les différents modèles que nous avons envisagés n'ont été appliqués qu'au cas d'un équipement pris isolément. Il serait intéressant d'appliquer cette démarche permettant d'obtenir la fiabilité prévisionnelle d'un système constitué de plusieurs équipements et pour lesquels différents indicateurs de dégradation sont disponibles. La difficulté réside dans la création d'un indicateur de synthèse tenant compte des multiples indicateurs propres à chaque équipement et à chaque mode de dégradation.

Bibliographie

- [1] O. Basile. Thèse de Doctorat, Université de Mons, Belgique. *Prise en compte de l'incertitude dans les modèles fiabilistes de maintenance industrielle. Extensions aux sollicitations variables*, 2007.
- [2] B. Kilundu. Thèse de Doctorat, Université de Mons. *Détection et diagnostic vibratoire de dégradation mécaniques : apport du data mining*, 2008.
- [3] A. Lesage et P. Dehombreux. Maintenance and Quality Control : A First Methodological Approach for Maintenance Policy Optimization. *Proceeding of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest (Romania)*, 2012.
- [4] P. Dehombreux et al. Université de mons (FPMs - Génie Mécanique), Institut de Recherche en Sciences et Management des Risques. *Manuel d'utilisation du logiciel Reliabilitix*, 2012.
- [5] K.T. Huynh et al. Maintenance Decision-making for Systems Operating Under Indirect Condition Monitoring : Value of Online Information and Impact of Measurement Uncertainty. *Author manuscript published in IEEE Transactions on Reliability*, 2 :410–425, 2012.
- [6] X.S. Si et al. A Wiener-process-based degradation model with a recursive filter algorithm for remaining useful life estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 35 :219–237, 2013.