



HAL
open science

Estimation de la fiabilité de pignons dans un système d'engrenage en utilisant les calculs parallèles

Mourad Yahia Bacha, Loïc Albouy, Céline Berthou

► **To cite this version:**

Mourad Yahia Bacha, Loïc Albouy, Céline Berthou. Estimation de la fiabilité de pignons dans un système d'engrenage en utilisant les calculs parallèles. Congrès Lambda Mu 21, “ Maîtrise des risques et transformation numérique : opportunités et menaces ”, Oct 2018, Reims, France. hal-02063814

HAL Id: hal-02063814

<https://hal.science/hal-02063814v1>

Submitted on 11 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ESTIMATION DE LA FIABILITE DE PIGNONS DANS UN SYSTEME D'ENGRENAGE EN UTILISANT LES CALCULS PARALLELES

ESTIMATION OF THE RELIABILITY OF GEARS IN A GEAR SYSTEM USING PARALLEL CALCULATIONS

Mourad YAHIA BACHA, Loic ALBOUY et Céline BERTHOU
Safran Aircraft Engines
Rond-point René Ravaut, 77550 Moissy – Cramayel

Résumé

L'objet de cet article est d'établir la loi d'endommagement des pignons tout au long de l'exploitation d'un moteur d'avion, essentiel à l'évaluation du risque en flotte et à l'anticipation d'éventuels événements en service. Pour des raisons évidentes de coût, de temps et de difficulté à reproduire en laboratoire les conditions réelles de fonctionnement du moteur, la loi d'endommagement n'a pas pu être évaluée sur des données expérimentales. Nous décrivons dans la suite du document la méthodologie suivie pour caractériser le vieillissement des pignons sur toute la vie du moteur. Cette étude de vieillissement tiendra compte des différentes actions de maintenance effectuées sur certains composants tels que les capteurs de couple qui peuvent impacter le vieillissement.

La problématique revient à établir un modèle général du couple subi par le ou les pignons étudiés et pour cela, à identifier tous les contributeurs au couple subi. Dans un premier temps, nous chercherons à connaître les contributeurs au couple subi par les pignons dans une situation de fonctionnement nominal, puis dans une situation de panne telle que la perte d'une voie de mesure, en nous basant sur l'analyse de panne des pignons.

Nous construirons ainsi un modèle global de calcul du couple subi par les pignons et caractériserons les distributions statistiques des différents contributeurs à ce modèle. Seront considérés dans le cadre de ce modèle : l'erreur de mesure, les oscillations de couple ainsi que certaines pannes qui peuvent mener à des pics de couple, identifiées à partir de l'analyse de panne composant.

A partir de ce modèle et par simulation de Monte Carlo, nous pourrons en déduire l'estimation de la distribution des instants de rupture des pignons sur toute la vie du moteur. Nous devons pour cela simuler la distribution de chaque paramètre d'entrée du modèle pour définir un état de fonctionnement à un instant donné. Le nombre de simulations à réaliser devant être suffisamment élevé pour fournir un résultat robuste dans un délai acceptable, nous avons été confrontés à des problèmes de performance de l'algorithme implémenté. Nous détaillerons ce qui a été mis en œuvre pour pallier à ce problème.

Summary

The purpose of this article is to define the damage law of the gears throughout an aircraft engine life, essential for the risk assessment in the fleet and the prediction of possible events in service. For obvious reasons of cost, time and difficulty in reproducing on laboratory the real conditions of operation of the engine, the law of damage could not be evaluated from experimental data. We will describe in the rest of the document the methodology that we followed to characterize the aging of the gears over the entire engine life. This aging study will take into account the different maintenance actions performed on certain components such as torque sensors and which may impact aging.

The problem is to establish a general model of the torque within the studied pinion or gears to identify all the contributors to this torque. First, we will look at the contributors to the torque experienced by the gears in a nominal operating situation, then in a failure situation such as the loss of a measurement channel, based on the failure analysis of gears.

We will thus construct a global model for calculating the torque experienced by the gears and characterize the statistical distributions of the different contributors to this model. The following will be considered in the model: measurement error, torque oscillations as well as certain failures that can lead to torque peaks, identified from the component failure analysis characterizing the effect of failures on the couple within the gears.

From this model and using Monte Carlo simulation, we will be able to deduce the estimation of the distribution of breaking times of the gears over all the engine life. We will have to simulate the distribution of each input parameter of the model to define an operating state for each contributor at any given moment. Since the number of simulations to be performed must be high enough to provide a robust result within an acceptable time, we have experienced performance issues. We will detail the implementation of our solution.

1 Contexte et objectifs

Le contexte général de notre communication concerne le vieillissement d'un ou plusieurs pignons, dimensionnés initialement pour un certain seuil de couple donné, et ne devant pas engendrer de limitation de durée de vie. Des dépassements du seuil peuvent limiter cette durée de vie. La problématique que nous avons résolue est la suivante : comment prendre en compte tous les contributeurs au couple subi par un ou plusieurs pignons tout au long de leur vie afin de quantifier la loi des instants de rupture de ces derniers ?

L'objectif de notre communication est de présenter une démarche originale permettant d'estimer la fiabilité d'un ou plusieurs pignons dans un système d'engrenage, en prenant en compte tous les contributeurs au couple subi par ce ou ces pignons tout au long de leur vie.

2 Méthodologie

Afin de résoudre la problématique posée ci-dessus, nous avons procédé en plusieurs étapes, que nous détaillerons dans la suite :

- Etape 1 : Identification de tous les contributeurs au couple subi par le ou les pignons étudiés (cela revient à établir un modèle général du couple subi),
- Etape 2 : Estimation des distributions statistiques de variation des contributeurs identifiés,
- Etape 3 : Caractérisation du vieillissement du ou des pignons étudiés,
- Etape 4 : Estimation de la distribution des instants de rupture du ou des pignons étudiés par simulation de Monte Carlo de leur vieillissement tout au long de l'exploitation du moteur.

Voici un diagramme général de la solution proposée pour la résolution de la problématique posée ci-dessus :

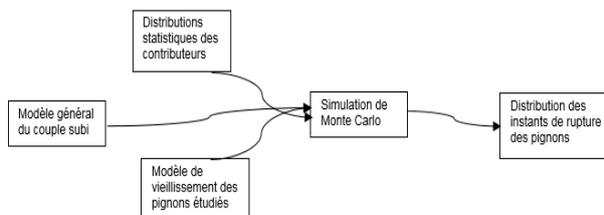


Figure 1. Diagramme général de la solution

2.1 Identification des contributeurs au couple subi par les pignons

Pour réaliser la première étape, nous avons besoin, d'une part, de connaître les contributeurs au couple subi par les pignons dans une situation de fonctionnement nominal, et d'autre part, dans une situation de panne (par exemple en cas de perte d'une voie de mesure). Dans ce dernier cas, on doit consulter l'analyse de panne du ou des pignons étudiés (cf. bibliographie [1], [2], [5], [6], [7] et [9]).

2.1.1 Cas de fonctionnement nominal

Dans un cas de fonctionnement nominal, les principaux contributeurs à l'estimation du couple subi par les pignons étudiés sont : le régime de fonctionnement, l'erreur de mesure, la réponse de dynamique de la boucle de régulation et les oscillations de couple.

Le couple est mesuré par un capteur composé de deux sondes de mesures (voies de mesures). Cette mesure comporte une erreur (systématique) qui est quantifiée

lorsque le moteur passe au banc d'essai avant d'être monté sur un avion (cf. 2.1).

Les oscillations de couple peuvent être corrélées aux vibrations du moteur en fonctionnement. Elles dépendent aussi de l'installation du moteur sur l'avion. L'évaluation de la distribution de ces oscillations se fait au moyen d'essais qui seront détaillés plus bas (cf. 2.2).

2.1.2 Cas de de panne

En cas de panne, d'autres contributeurs au couple subi sont à prendre en compte. Tout d'abord, en cas de perte d'une voie de mesure, la valeur du couple mesuré ne sera issue que d'une seule voie, et alors plusieurs cas de figure sont à prendre en compte, notamment le fait que la voie de mesure résiduelle peut surestimer ou sous-estimer la valeur réelle du couple.

Par ailleurs, la panne de certains composants, que nous ne détaillerons pas ici, peut aussi engendrer des pics de couple qui seront subis par le pignon. Dans tous les cas, on se réfère à l'analyse de panne composant pour être sûr de considérer tous les contributeurs au couple subi par les pignons.

2.1.3 Algorithme de calcul de l'endommagement du pignon

L'endommagement est calculé par un algorithme intégrant le niveau et le temps d'exposition au couple excédant le niveau maximum spécifié. Ces algorithmes d'endommagement sont une donnée d'entrée venant du concepteur des pignons. Ils sont en partie basés sur les courbes matériaux. Ainsi, un compteur d'endommagement est mis en place, représentant simplement le cumul des endommagements calculés à chaque vol. Lorsque ce cumul d'endommagement atteint la valeur 1, on suppose qu'on a une rupture d'une dent du pignon.

A titre d'illustration, voici un exemple d'un compteur d'endommagement :

$$D_i = \sum_i f(t_i, c_i) \quad \{1\}$$

où t_i représente le temps d'exposition au couple c_i sur le vol i , et f la fonction permettant de calculer l'endommagement à chaque vol i .

2.1.4 Modèle général du couple subi par les pignons

L'endommagement des pignons a lieu lorsque l'on dépasse un certain niveau de couple. L'étude considère les phases de vol où le niveau de couple commandé (demandé) est maximum.

La forme générale du modèle du couple global aux phases de vols indiquées peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Couple global (Nm)} = & \text{Couple maximal commandé (Nm)} + \\ & \text{Précision de mesure du couple (Nm)} + \\ & \text{Niveau d'oscillations (Nm)} + \\ & \text{Contributeurs en mode panne (Nm)} \quad \{2\} \end{aligned}$$

2.2 Estimation des distributions statistiques des contributeurs au couple subi par les pignons

Lorsque le modèle global de calcul du couple subi par les pignons étudiés est établi, il faut ensuite caractériser les distributions statistiques des différents contributeurs à ce modèle.

Plus haut, nous avons évoqué l'erreur de mesure, les oscillations de couple ainsi que certaines pannes qui peuvent mener à des pics de couple. Pour le dernier contributeur, c'est l'analyse de panne composant, réalisée

au préalable, qui permet de caractériser l'effet des pannes sur le couple subi par les pignons.

2.2.1 Caractérisation de l'erreur de mesure du couple

Concernant la distribution de l'erreur de mesure du couple subi par le pignon, celle-ci est caractérisée au moyen d'un essai de réception « Pass Off Test ». En effet, lors de ces tests, la valeur réelle du couple est connue et on évalue alors l'erreur de mesure des deux capteurs. En fonctionnement nominal, la valeur du couple retenue et qui sera utilisée pour les lois de régulation du moteur est la moyenne des deux voies de mesure. Un exemple des distributions des erreurs des deux voies de mesure est donné ci-dessous :

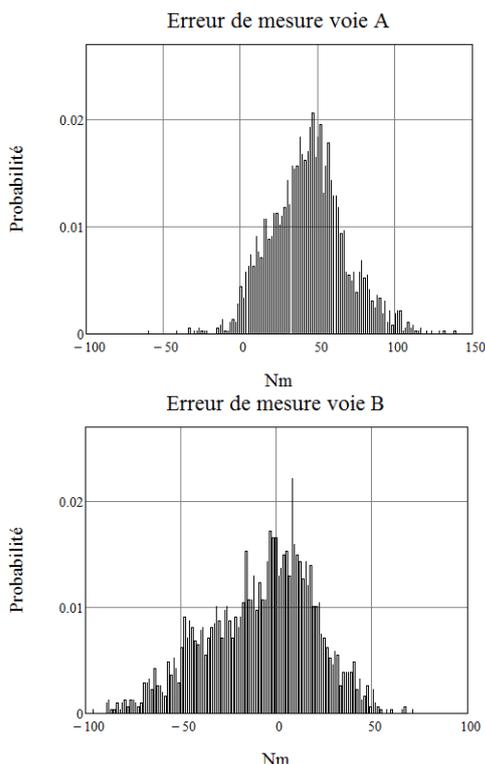


Figure 2. Exemple des distributions de l'erreur de mesure des deux voies

Pour simuler le vieillissement du pignon, nous ferons des tirages par bootstrap dans les distributions ci-dessus, pour éviter les biais éventuels qui peuvent être générés par une estimation paramétrique des distributions ci-dessus.

2.2.2 Caractérisation des oscillations de couple

Comme expliqué précédemment, les oscillations sont corrélées principalement aux vibrations subies par le moteur ainsi qu'à son installation sur l'avion. Pour caractériser ces oscillations, on utilise les résultats d'essais. Par ailleurs, connaissant la distribution des vibrations sur la vie de l'avion (fournie par l'avionneur) et le lien entre celles-ci et les oscillations de couple, il est alors possible d'estimer le temps passé dans chaque niveau d'oscillation de couple. En pondérant ce temps passé dans chaque niveau d'oscillation de couple par la durée de vie de l'avion, on obtient alors une

distribution des oscillations de couple que vont subir les pignons étudiés. Voici un exemple de cette distribution :

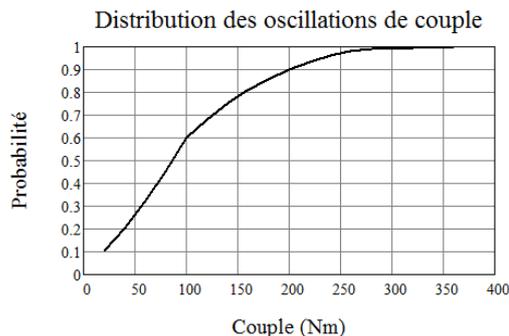


Figure 3. Exemple d'une distribution des niveaux d'oscillations de couple (seule la partie positive des oscillations est représentée)

Pour chaque vol, cette distribution va nous permettre de simuler l'oscillation de couple à ajouter au couple maximal commandé. Dans un souci de simplification, nous avons réduit l'oscillation de couple à une seule valeur, car il s'agit en réalité plutôt d'une courbe que l'on devrait appliquer au couple maximal commandé sur l'ensemble du temps d'exposition considéré.

2.3 Caractérisation du vieillissement des pignons étudiés

Dans cette partie, le but est de décrire de manière précise le vieillissement des pignons étudiés en matière de maintenance que ces derniers peuvent subir tout au long de leur vie sur le moteur. En effet, toute action de maintenance sur les capteurs de couple par exemple, viendrait modifier leurs distributions d'erreur.

Ainsi, on peut imaginer que les capteurs soient changés tous les N vols, et on caractérise alors la modification de la valeur de l'erreur que feraient ces capteurs. De manière générale, les essais montrent que lorsque cette maintenance est appliquée, cela vient ajouter un biais aléatoire choisi de manière uniforme entre $[-K \text{ Nm} ; K \text{ Nm}]$.

Une maintenance est aussi réalisée sur les pignons, elle permet de gagner du potentiel. On suppose que les pignons sont remplacés tous les M vols, l'endommagement est alors réinitialisé à 0.

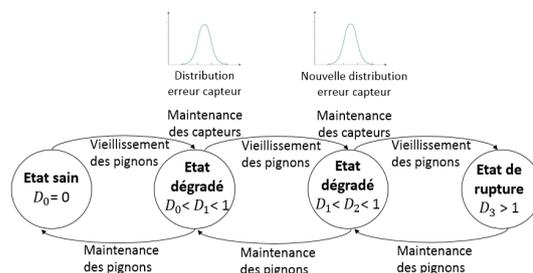


Figure 4. Schéma représentant un exemple de vieillissement des pignons

2.4 Estimation de la distribution des instants de rupture des pignons étudiés par simulation de Monte Carlo

Le vieillissement d'une boîte d'engrenage peut être simulé selon le schéma suivant :

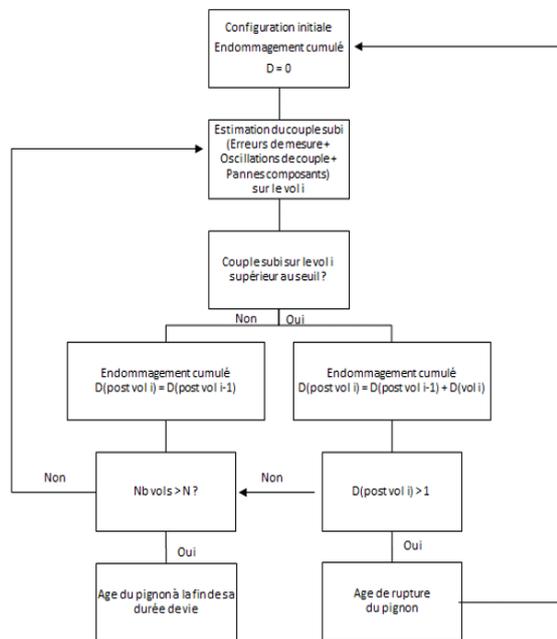


Figure 5. Simulation du vieillissement d'une boîte d'engrenage

Initialement, le cumul de l'endommagement est nul. La durée de vie des pignons est donnée par un nombre de vols prédéfini, correspondant à la durée de vie du moteur ou de l'avion.

Pour chaque contributeur au couple, une distribution est simulée donnant l'état de fonctionnement du contributeur à chaque vol donné. Les valeurs obtenues pour ces différentes sources de contribution sont sommées et fournissent l'estimation du couple subi par les pignons.

Si ce couple est inférieur au seuil pour chacune des phases du vol, l'endommagement reste inchangé. En revanche, si au moins l'une des phases présente une valeur de couple supérieure au seuil alors l'endommagement cumulé sur le vol courant sera sommé au potentiel d'endommagement déjà cumulé depuis l'entrée en service de la pièce.

Lorsque l'endommagement de la pièce atteint son potentiel de 1, celle-ci sera considérée comme rompue et sera donc remplacée par une autre pièce de même définition qui va à son tour cumuler un endommagement tout au long du reste de la durée de vie du moteur. Tant que la pièce n'a pas atteint son potentiel de 1 et que la durée de vie du moteur n'a pas été atteinte, elle reste en fonctionnement.

Le cumul de l'endommagement peut être calculé simultanément sur plusieurs équipements comportant chacun un seuil propre de cumul de l'endommagement.

Le vieillissement d'une boîte d'engrenage est simulé plusieurs fois. Cette simulation de Monte Carlo [8] permet

d'estimer la distribution des instants de rupture du pignon (cf. Figure 6).

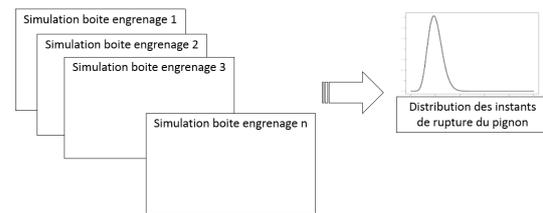


Figure 6. Estimation de la distribution des instants de rupture du pignon par simulation de Monte Carlo

Lorsque la rupture du pignon est rare, ce qui est souvent le cas, il est difficile de caractériser complètement la distribution des instants de rupture du ou des pignons étudiés. Dans ce cas, on considère que la distribution recherchée est une loi exponentielle de paramètre λ , telle que :

$$\lambda = \frac{\text{Nombre de pannes simulées}}{\text{Exposition totale simulée}} \quad \{3\}$$

où le nombre de pannes simulées correspond au nombre total de pannes obtenues sur toutes les simulations de Monte Carlo et l'exposition totale simulée correspond à la durée de vie du moteur (en heures) multiplié par le nombre de simulations de Monte Carlo réalisé.

2.5 Performances de calculs

Pour cette simulation de Monte Carlo, le nombre de calculs à réaliser et donc le temps d'exécution associé sont élevés, de l'ordre de plusieurs heures. En fait, le vieillissement simulé consiste à cumuler l'endommagement sur chaque vol sur toute la durée de vie du moteur, ce qui explique le fait que le temps de calcul soit assez conséquent. Par ailleurs, la complexité de la maintenance simulée est aussi un facteur qui influe sur le temps de calcul.

Ainsi, dans la mesure où les simulations de Monte Carlo sont indépendantes entre elles, nous avons cherché à exécuter les calculs en parallèle. Nous avons utilisé, pour cela, le package DoParall du logiciel R [4]. Ce package, d'une utilisation très simple, permet d'exploiter la puissance de l'ensemble des processeurs de l'ordinateur pour optimiser le temps de calcul.

Dans notre cas d'étude, les calculs ont été lancés dans un premier temps sur un ordinateur de 8 cœurs, puis sur un serveur de 24 cœurs, ce qui a permis de diviser par trois les temps de calculs.

Le nombre de simulations est fixé de telle sorte à avoir une convergence du paramètre λ à 10^{-6} près. Dans la partie « 3 Exemple d'application », nous illustrerons cette convergence du paramètre λ par un intervalle de confiance sur la distribution obtenue.

Finalement, une simulation pouvant durer près de 8 heures sans parallélisation, s'exécute en près de 20 minutes en parallélisant les calculs avec un serveur ayant 24 cœurs.

Cette parallélisation des simulations de Monte Carlo aurait pu aussi être réalisée sur un Cluster Hadoop, en codant le même formalisme de la fonction FUNcombine, en Spark par exemple, afin de rassembler l'ensemble des résultats exécutés sur les différents nœuds du Cluster. Toutefois, un serveur de calcul avec des processeurs puissants peut être aussi performant qu'un Cluster Hadoop avec des nœuds

disposant soit d'un nombre insuffisant de processeurs soit de processeurs peu puissants.

3 Exemple d'application et validation

Dans cette partie, nous présenterons à titre d'exemple les résultats de 10 simulations de Monte Carlo sur la vie complète d'un moteur d'avion disposant d'une boîte d'engrenage avec les pignons étudiés. Chaque simulation de Monte Carlo simule le vieillissement de 10⁵ vies complètes d'un moteur. Le premier résultat de la simulation de Monte Carlo est le paramètre λ de la loi exponentielle représentant la loi des instants de rupture des pignons.

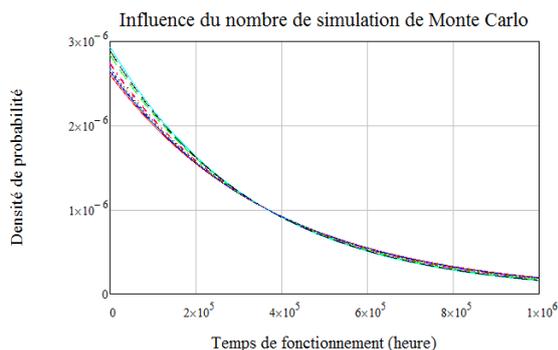


Figure 7. Densité de probabilité des instants de rupture de pignon

On constate la convergence de la simulation de Monte Carlo car les densités de probabilité obtenues sont très similaires d'une simulation de Monte Carlo à une autre. Ceci vient du fait que le nombre de simulations de Monte Carlo, fixé à 10⁵ simulations, est suffisant.

Cette distribution va permettre de calculer le taux de défaillance pour un événement redouté pouvant impacter la sécurité de l'avion [3], et ainsi décider d'actions éventuelles sur les moteurs en flotte, comme le changement prématuré des pignons ou la mise en place d'inspections pour contrôler l'état des pignons.

Dans notre cas, nous avons utilisé cette méthodologie pour dimensionner un plan de maintenance concernant des pignons d'une boîte d'engrenage d'un moteur d'avion produit par Safran Aircraft Engines et d'autres partenaires.

Cette méthode probabiliste a été validée en interne de la société par les experts système, sûreté de fonctionnement et statistiques.

Par ailleurs, cette méthodologie a été présentée et approuvée par l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne, EASA.

A ce jour, le plan de maintenance mis en place par cette méthodologie a démontré son efficacité car aucun pignon rompu n'est à déplorer.

Par ailleurs, afin de vérifier la continuité de la validité des hypothèses prises en compte, notamment la distribution de l'oscillation de couple et l'erreur de mesure, des données de vols et d'essais sont régulièrement analysées.

Le deuxième résultat de cette simulation de Monte Carlo est le spectre de couple. Il s'agit du temps moyen passé dans les différents niveaux de couple.

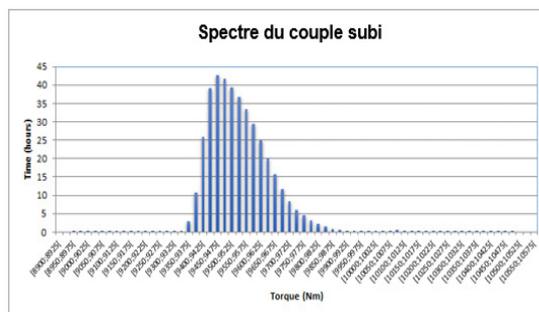


Figure 8. Spectre du couple subi (en ordonnée : temps en heures ; en abscisse : valeur du couple subi en Nm)

Cette distribution du temps en heures passé à chaque niveau de couple tout au long de la vie du moteur peut être utilisée par exemple pour dimensionner un nouveau pignon.

4 Conclusion

La méthodologie décrite ci-dessus permet de disposer d'une loi d'endommagement qui est nécessaire pour évaluer le risque en flotte et pouvoir anticiper d'éventuels événements en service.

De plus, cette méthodologie permet de tester la maintenance mise en place, et valider éventuellement des extensions de pas de remplacement des pignons.

Par ailleurs, cela permet de disposer d'un spectre donnant le temps passé à chaque niveau de couple, ce qui peut être utilisé pour spécifier une nouvelle configuration de pignons résistant à un niveau de couple plus important.

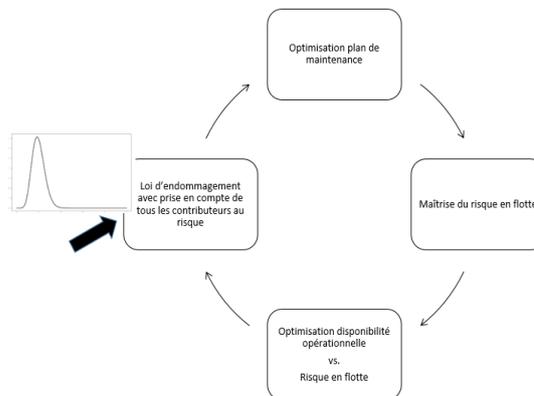


Figure 9. Apport de la loi d'endommagement dans la maîtrise du risque en flotte

Enfin, cette loi d'endommagement des pignons pourrait être obtenue en réalisant des essais mais cela présenterait deux inconvénients principaux :

- le coût représenté par ces essais et parfois le temps assez long de mise en œuvre et de réalisation,
- la difficulté de reproduire en essais les conditions réelles de fonctionnement.

5 Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à l'élaboration de cet algorithme tant du côté métier avec des connaissances liées à l'équipement, les matériaux et le phénomène physique du phénomène étudié que sur le plan statistique, sûreté de fonctionnement, algorithmique et optimisation informatique. Cette application a pu être établie grâce à l'interaction de ces différents métiers.

6 Références

- [1] Armel Doyer Septembre 2012, « How Bearing Design Improves Gearbox Performance ».
- [2] Bill Bradley Juillet 2009, « An International Wind Turbine Gearbox Standard ».
- [3] Dr. Stefan Beermann Mars/Avril 2018, « Reliability, Lifetime and Safety Factors ».
- [4] GNU R est un logiciel libre distribué selon les termes de la licence GNU GPL. R est un langage de programmation et un logiciel libre dédié aux statistiques et à la science des données soutenu par la R Foundation for Statistical Computing.
- [5] Jane Muller et Robert Errichello Septembre 2013, « How to Inspect a Gearbox ».
- [6] Pattabiraman Trichy Ramakrishnan, « Gearbox Fault Analysis by Sideband Energy Ratio Technique: A Practical Insight into Gear Health Monitoring and Fault Diagnosis ».
- [7] R. J. Drago Juin 2009, « The Effect of Start-Up Load Conditions on Gearbox Performance and Life Failure Analysis, With Supporting Case Study ».
- [8] Reuven Y. Rubinstein et Dirk P. Kroese, « Simulation and the Monte Carlo Method ».
- [9] Travis Histed and Chad Glinsky, Romax Technology, Inc Juin 2017, « Wind Turbine Gearbox Reliability ».