



The 1st International Conference on Local Resource Exploitation

www.lorexp.org / info@lorexp.org

REF: LOREXP_2021_A1146 Pages: 930–938



Modélisation de la fiabilité dynamique et évaluation des performances du régulateur de vitesse dans les moteurs des locomotives

Dynamic reliability modeling and evaluation of speed regulator performance in locomotive engines

Offole Florence^{1,*}, Essola Dieudonné¹, Nguimang Lekane¹ et Bouheul Charly¹

¹ Université de Douala, P.O. Box 2701, Douala-Cameroun.

* Auteur Correspondant : florenceoffole@yahoo.fr

ABSTRACT:

The engine is one of the essential organs for moving locomotives from a train. It consists of different subsystems that interact with each other in an orderly manner to produce optimal functioning. Nowadays, apart from the basic mechanical principle the control is managed by electromechanical systems. One of the major bodies to facilitate the optimization of the locomotive engine is the cruise control on which the study of dynamic reliability modelling and evaluation of these performance will be conducted in this work. When the engine is running, the cruise control is exposed to failures that result in lower reliability and thus lower engine performance, hence the need to optimize its performance, in order to avoid operational shutdowns that could result in huge economic losses in consumption, function and due to a shutdown. This work will assess the dynamic reliability of the cruise control, assess its current performance and quantify the wear and tear of contact parts inside the cruise control system in order to optimize the performance of the cruise control. The functional, dysfunctional and stochastic modeling of the cruise control has been developed, using petri-made networks as well as a calculation of availability and wear rate. The results obtained show that there is a rapid decrease in reliability as time elapses this is due to the wear and tear of the parts inside the cruise control. To compensate for this phenomenon, an oil analysis was developed to detect possible detached particles, which allowed us to improve reliability and thus optimize the performance of our cruise control and thus the engine.

Keywords: Modeling, Dynamic reliability, Performance, Engines, Locomotives.

RÉSUMÉ :

Le moteur est l'un des organes essentiels pour le déplacement des locomotives d'un train. Il est constitué de différents sous-systèmes qui interagissent entre eux de manière ordonnée pour produire le fonctionnement optimal. De nos jours, en dehors du principe mécanique de base la commande est gérée par les systèmes électromécaniques. L'un des organes majeurs permettant de faciliter l'optimisation du moteur des locomotives est le régulateur de vitesse sur lequel l'étude de la modélisation de la fiabilité dynamique et de l'évaluation de ces performances sera menée dans ce travail. Lorsque le moteur est en marche, le régulateur de vitesse est exposé à des défaillances qui a pour conséquence la baisse de fiabilité et ainsi la baisse des performances du moteur d'où la nécessité d'optimiser ses performances, afin d'éviter les arrêts de fonctionnement qui pourraient entraîner des pertes économiques énormes en consommation, en fonction et à cause d'un arrêt. Il sera question dans ce travail, de modéliser la fiabilité dynamique du régulateur de vitesse, d'évaluer ses performances actuelles et de quantifier l'usure des pièces en contact à l'intérieur du régulateur de vitesse dans l'objectif d'optimiser les performances du régulateur de vitesse. La modélisation fonctionnelle, dysfonctionnelle et stochastique du régulateur de vitesse a été élaborée, à l'aide des réseaux de pétris ainsi qu'un calcul de la disponibilité et du débit d'usure. Les résultats obtenus montrent qu'il y a diminution rapide de la fiabilité au fur et à mesure que le temps s'écoule ceci est dû au phénomène d'usure des pièces à l'intérieur du régulateur de vitesse. Pour pallier à ce phénomène, une analyse des huiles a été élaborée pour détecter d'éventuelles particules détachées, ce qui nous a permis d'améliorer la fiabilité et donc d'optimiser les performances de notre régulateur de vitesse et de ce fait du moteur.

Mots clés : Modélisation, Fiabilité dynamique, Performances, Moteurs, Locomotives.

1. INTRODUCTION

Le train est aujourd'hui un des moyens de transport permettant le déplacement des biens et personnes. Son bon fonctionnement dépend essentiellement de son moteur car c'est lui qui produit l'énergie thermique permettant le déplacement du train.

De nos jours, la compétitivité des marchés industriels fait que les aspects de qualité de produits et de services ont une grande importance. De même la productivité d'une entreprise est directement liée au bon fonctionnement de ses machines. On voit ainsi apparaître chez les industriels, qu'ils soient clients ou fournisseurs, un besoin grandissant de mesurer ou d'améliorer la fiabilité des produits qu'ils vendent ou qu'ils utilisent (Mihalache, 2007 ; Malik, 2004).

L'objectif de ce travail est d'évaluer ses performances actuelles et de quantifier l'usure des pièces en contact à l'intérieur du régulateur de vitesse dans le but d'optimiser les performances du régulateur de vitesse.

Il est donc important de connaître les mécanismes de défaillance pour déterminer l'architecture optimale d'un système mécatronique et pour évaluer sa fiabilité (Procaccia et al., 2011).

La fiabilité des systèmes décrit l'évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du temps t et permet de mettre en évidence, de manière empirique, trois phases de la vie du produit, à savoir la période de jeunesse, période de vie utile et la période de vieillissement. La période d'usure ou de vieillissement correspond aux défaillances dues à des phénomènes d'usure, de vieillissement, dégradation (Fort et al., 2014). Nous allons nous intéresser dans la suite de nos travaux aux composants mécaniques car ils sont les plus sujets à l'usure.

Les composants mécaniques sont soumis, dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement. Ils sont caractérisés par des mécanismes de dégradation souvent complexes, d'origines variées (fatigue, fluage, fissuration, usure, corrosion/oxydation, désagrégation) (Lalanne, 1999 ; Doyle 1991). La fatigue considérée comme est la plus importante source de défaillance pour les composants mécaniques consiste la dégradation ou la modification des propriétés mécaniques des matériaux, suite à l'application répétée d'un chargement cyclique ou d'une vibration, conduisant à une rupture (Noll, 1997).

L'usure est liée au frottement entre deux pièces mécaniques provoquant l'augmentation du jeu entre elles (élimination de matière) (Descartes, 1997). A l'aide d'investigations numériques, il convient d'identifier l'activation du débit source de troisième corps pendant toute la durée de fonctionnement d'un contact.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Etude de la fiabilité fonctionnelle et dysfonctionnelle

Les différentes lois utilisées en fiabilité sont :

- La loi de Weibull pour modéliser la fiabilité des composants mécaniques :

$$R(t)=e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

- La loi exponentielle pour modéliser la fiabilité des composants électroniques :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{2}$$

- La loi log normale pour modéliser la fiabilité des composants défaillants en fatigue :

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt \tag{3}$$

2.2. Modélisation de la fiabilité prévisionnelle à partir des réseaux de pétri

Ainsi, nous disposons pour chaque composant du système d'une ou plusieurs lois de fiabilité. Les paramètres des lois et leurs incertitudes sont définis à partir de plusieurs sources d'informations, ce qui permettra d'alimenter le modèle stochastique du RdPSD.

2.2.1. Usure « artificielle » et contraintes dans les premiers corps

Il est utile d'exprimer les intégrales des débits source et d'usure que l'on nommera débits cumulés. Il s'agira de la quantité totale du troisième corps, produite ou éjectée, depuis le début de fonctionnement par la loi mathématique :

$$Q_S^{cum}(t) = \int_0^t Q_S(t). dt \tag{4}$$

$$Q_u^{cum}(t) = \int_0^t Q_u(t). dt \tag{5}$$

2.2.2. Modèle fonctionnel et dysfonctionnel

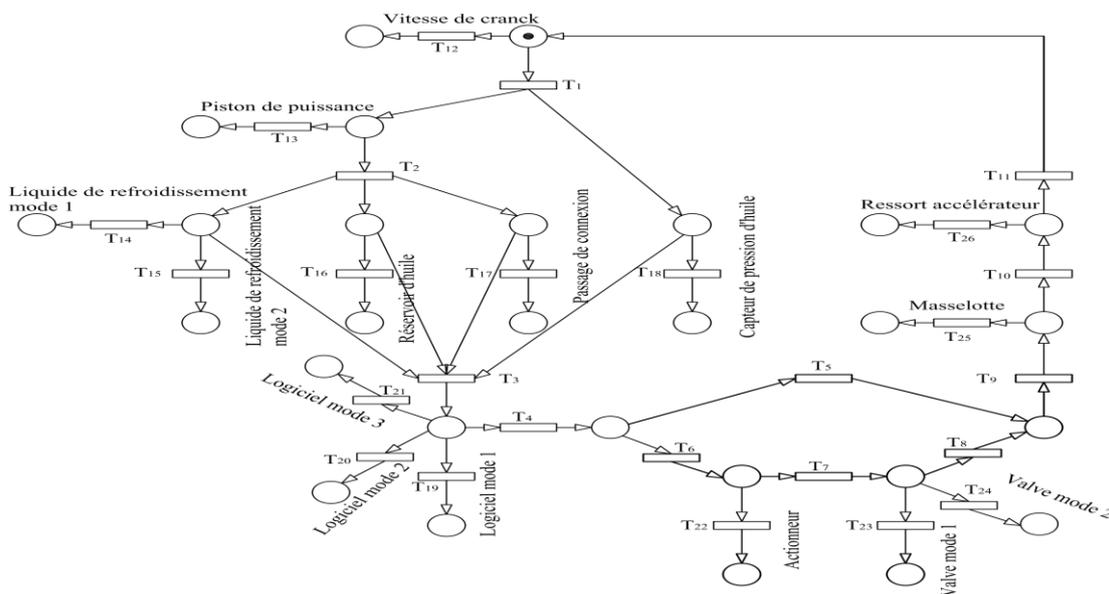


Figure 1. RdPSD du régulateur de vitesse.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Modélisation de la fiabilité prévisionnelle du régulateur de vitesse

La modélisation choisie ici nous permet d'évaluer la fiabilité du système, nous permettant ainsi d'évaluer les performances du moteur. Après cette analyse, le calcul de traçage et les simulations seront implémentés dans Matlab associés chacune d'une interprétation et d'une discussion.

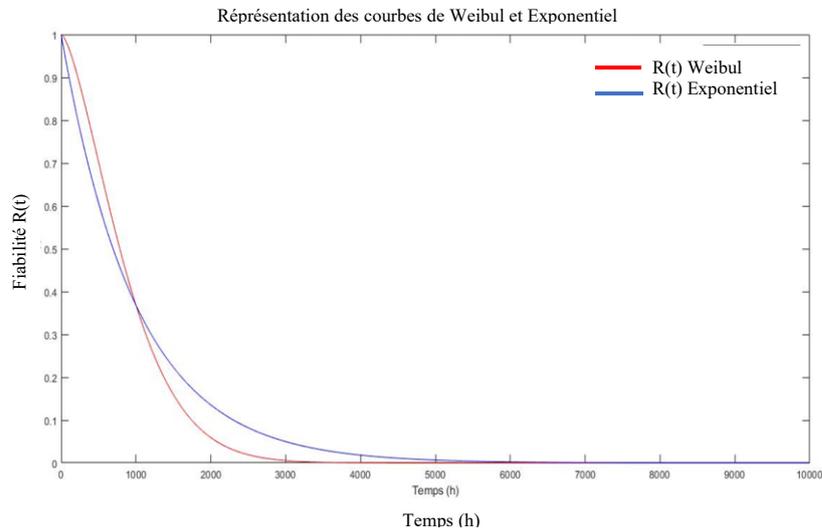


Figure 2. Comparaison de la loi de weibull et la loi exponentielle

La figure 2 présente deux courbes donc l'une des courbes en rouge correspond à la loi de weibull représentant la fiabilité des composants mécaniques et la deuxième courbe en bleue correspond à la loi exponentielle représentant la fiabilité des composants mécaniques du régulateur de vitesse. Nous constatons que l'évolution de la fiabilité des composants mécaniques est différente de l'évolution de la fiabilité des composants électroniques tout juste parce que chacun joue un rôle différent dans le système et bien plus ne sont pas conçus avec des mêmes matériaux lors de la fabrication. Nous constatons qu'à l'instant $t = 0h$ de fonctionnement la fiabilité décroît de façon exponentielle. Au départ nos deux composants sont fiables et après 1000h de fonctionnement les composants mécaniques se détériorent plus rapidement que les composants électroniques. Nos résultats sont meilleurs par rapport aux travaux de Fort et al. (2014) présentent les défaillances dues à des phénomènes d'usure, vieillissement et de dégradation. Pour pouvoir palier à ce problème nous avons défini un nouveau paramètre d'échelle η car c'est lui qui conditionne la durée de vie des composants.

Nous obtenons une nouvelle valeur de la loi de weibull qui sera appelé loi de Weibull Estimé donc le seul paramètre ayant été modifié est le paramètre d'échelle η qui sera modélisé de la même façon que la courbe de la loi de Weibull de figure 2 et qui est représenté par la figure 3 avec superposition de la figure 2 pour meilleur visibilité et appréciation.

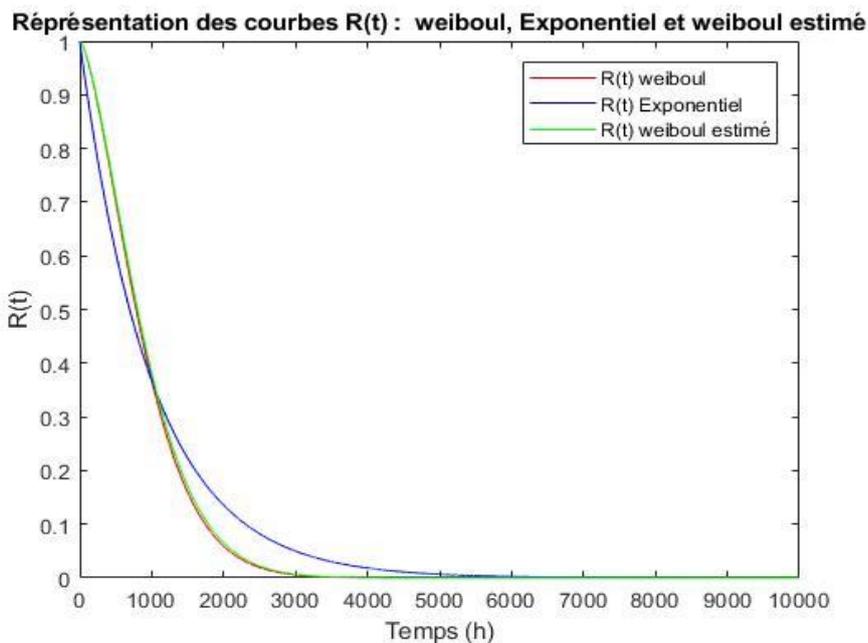


Figure 3. Comparaison des lois de Weibull, loi Exponentielle et loi de Weibull estimé.

La figure 3 présente l'évolution de la fiabilité au cours du temps. Ici la courbe en rouge présente la loi de weibull, la courbe en bleue présente la loi exponentielle et la courbe en verte présente la loi de weibull estimé. Cette courbe de la loi de weibull estimé permet d'apporter les solutions à la courbe de la loi de weibull de la figure 2 du fait de la différence d'évolution de la fiabilité entre la loi de weibull et la loi exponentielle. Pour mieux contrôler les phénomènes de dégradations, compare aux travaux de Doyle (1999) et Lalanne (1999).

Dans le but d'obtenir de bons estimateurs de la fiabilité avec un minimum de composant, nous avons calculé la valeur théorique de référence qui est obtenue à nouveau par simulation en considérant un nombre important de système, ce qui nous a permis d'obtenir la figure 4.

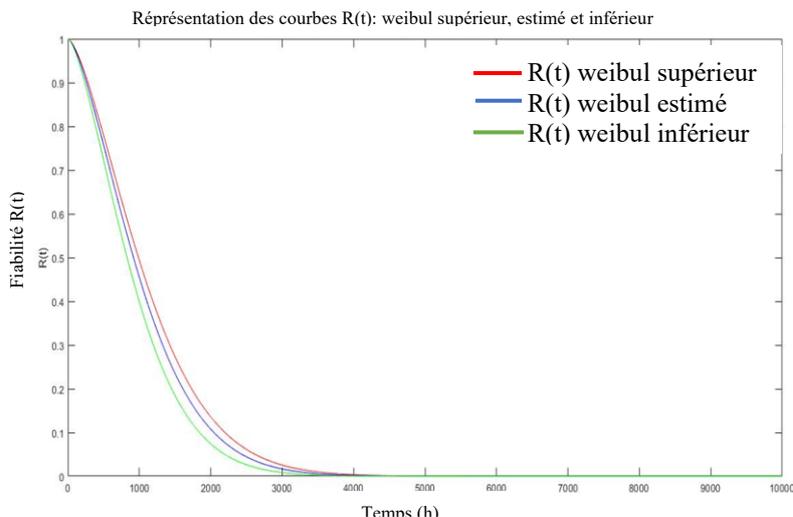


Figure 4. Fiabilité prévisionnelle du régulateur de vitesse

Nous présentons l'évolution de la fiabilité prévisionnelle, avec la loi de Weibull car c'est la fiabilité du régulateur de vitesse que nous cherchons et non pour les composants donc, cette fiabilité doit juste être modélisée à l'aide d'une seule loi d'où la loi de Weibull car le régulateur de vitesse est composé essentiellement des composants mécaniques

Dans la figure 4, nous constatons qu'à $t = 500h$ la fiabilité du régulateur de vitesse diminue cela montre que le régulateur de vitesse devient moins fiable ce qui est dû à plusieurs phénomènes donc nous pouvons citer la dégradation de ses composants, entraînant la détérioration ainsi que l'usure des organes. L'usure des composants provoquant la baisse des performances du régulateur de vitesse nécessitera alors d'être simulée.

3.2. Cas de l'usure artificielle

Dans la première partie de la simulation (jusqu'à une distance adimensionnée de 500) on observe, classiquement, l'établissement d'une couche stable de troisième corps (figure 5). A partir du moment où l'on retire des particules de troisième corps, le nombre total de particules à l'intérieur du contact tend à diminuer. Mais alors que la quantité de troisième corps interne atteint une valeur seuil minimale, le débit source est à nouveau activé. La quantité de troisième corps interne augmente à nouveau, avec un maximum correspondant à l'épaisseur stable pour les contacts fermés ce qui veut dire que l'éjection des particules continue.

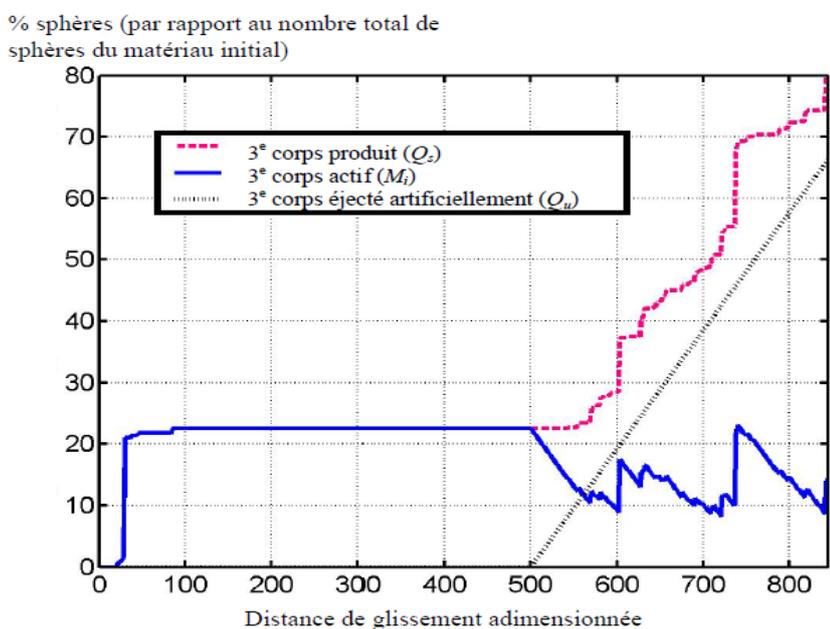


Figure 72 : Evolution des débits source et d'usure cumulés et de la quantité de troisième corps. Un débit d'usure artificiel est imposé à partir d'une distance de glissement adimensionnée de 500.

Figure 5. Evolution des débits source et d'usure cumulés et de la quantité de troisième corps.

La quantité de troisième corps dans le contact varie entre deux valeurs extrêmes correspondant l'une à un niveau pour lequel les détachements n'apparaissent plus, et l'autre à un niveau pour lequel les détachements

apparaissent forcément. On peut remarquer que la nouvelle quantité moyenne de troisième corps dans le contact est toujours inférieure à celle d'un contact fermé. Les résultats sont meilleurs que celles des travaux de Noll (1997) et Descartes (1997).

Sur la figure 6 on peut constater un début de formation des particules de troisième corps du au frottement de deux composants dans le régulateur de vitesse (piston de puissance et masselottes), provoquant ainsi la dégradation de leurs composants affectant ainsi les performances du régulateur de vitesse. Lorsque la quantité de troisième corps diminue, les contraintes dans le matériau augmentent. Ce qui explique la réactivation du détachement des particules. Lorsque cette quantité augmente, les contraintes diminuent. Lorsque les contraintes atteignent un niveau minimum, les « dégradations » du matériau sont minimales et il y a une grande baisse de production de troisième corps. La quantité de troisième corps est alors à son niveau maximum.

Cas de l'usure naturelle : Investigation numérique

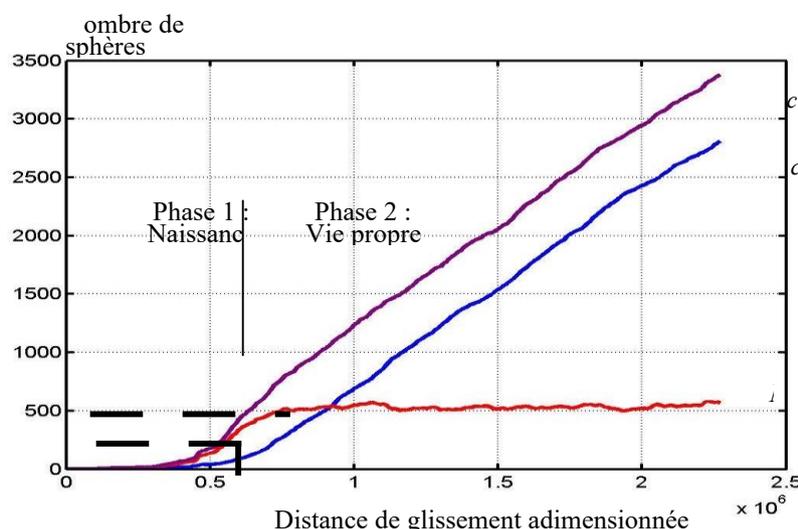


Figure 6. Evolution générale des débits source et d'usure et de la quantité de troisième corps (simulation numérique).

On peut distinguer deux phases :

- Phase 1. Dans un premier temps, il n'y a pas d'éjection de particules hors du contact. Il y a seulement production de particules, jusqu'à la formation d'une certaine couche de troisième corps. A partir d'une quantité M_i^{seuil} , le débit d'éjection est activé.

- Phase 2. On atteint alors très vite un état particulier du contact. Chaque sphère de troisième corps éjectée est aussitôt remplacée par l'intermédiaire d'un nouveau détachement. La principale conséquence est que la quantité M_i de troisième corps dans le contact est constante, malgré une production et une éjection de particules intense. Cette quantité sera notée M_i^{stab} par la suite.

Le débit source, moins important que dans la première phase est maintenant le reflet du débit d'usure. Ces deux débits deviennent égaux, et ils présentent, de façon remarquable, une activation constante au cours du temps ou de la distance de glissement (ce qui donne des débits cumulés linéaires en temps).

3.3. Validations comportementales de la fiabilité prévisionnelle à partir des réseaux de pétri la simulation de Monte-carlo

Cette simulation permet de valider le réseau de pétri présenté à la figure 2.

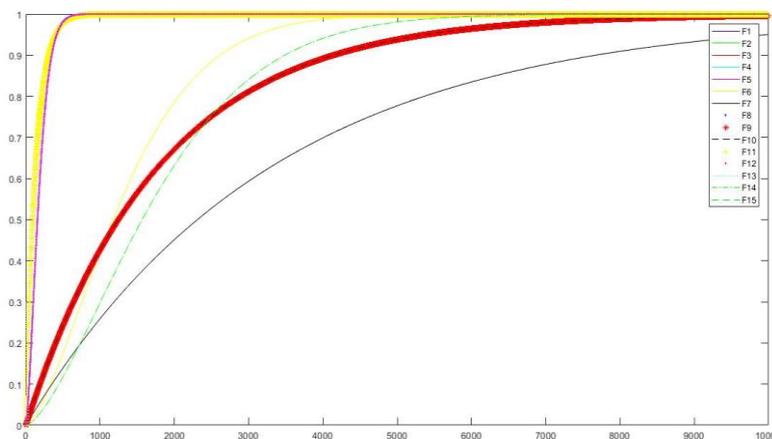


Figure 7. Évaluation de la sensibilité prévisionnelle du régulateur de vitesse

La validation du modèle de réseau de pétri du régulateur de vitesse permet d'évaluer la sensibilité pour pouvoir déterminer le composant le plus fiable et le composant le moins fiable du régulateur de vitesse. Dans le cas de la figure 7 le composant le plus fiable est le composant F7 correspondant au piston de puissance et le composant le moins fiable est le composant F5 correspondant aux masselottes.

3.4. Détection des pannes et planification de la maintenance préventive

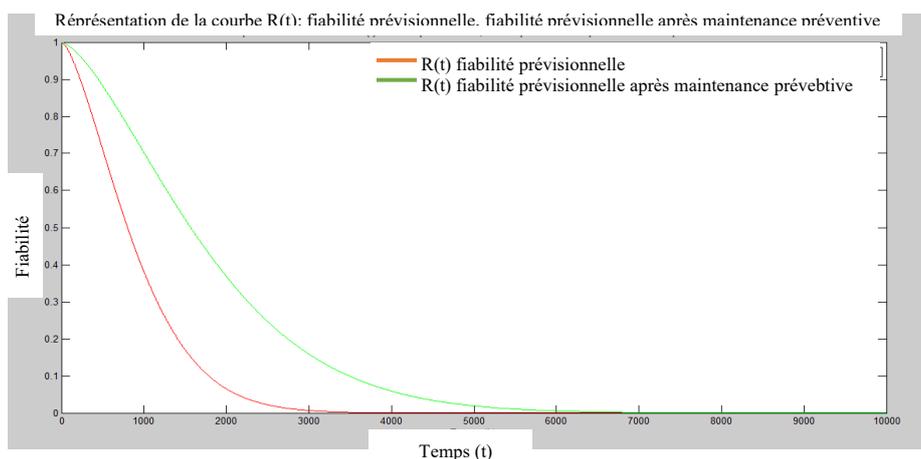


Figure 8. Comparation entre la courbe de la fiabilité prévisionnelle (rouge) et la courbe de la fiabilité prévisionnelle après application de la maintenance préventive (verte)

On remarque dans la figure 8 un écart considérable entre ces deux courbes. En effet, cet écart est traduit par le fait que la maintenance préventive fait croître de façon assez significative la fiabilité du régulateur

de vitesse. Lors de la phase de dysfonctionnement, la fiabilité du régulateur est presque nulle après 3200 heures de fonctionnement ; en outre le régulateur de vitesse est en arrêt après 3200 heures de fonctionnement d'exploitation car nous avons la présence des défaillances. Nous constatons une réelle évolution de la fiabilité du régulateur de vitesse avec le temps, d'où l'augmentation de la disponibilité du régulateur de vitesse et une hausse des performances.

4. CONCLUSION

Il était question de modéliser la fiabilité dynamique et évaluer les performances du moteur des locomotives à travers les données recueillies dans le but d'optimiser les performances du système. Notre objectif a été de déterminer la fiabilité prévisionnelle du régulateur de vitesse afin de la modéliser ainsi que de déterminer les critères de performances afin d'évaluer ses performances. L'évaluation de performance a été faite uniquement sur le régulateur de vitesse ainsi que sa modélisation comme organe qui conditionne et regule le fonctionnement moteur. Pour les utiliser, nous avons eu à développer à travers des différentes méthodes une analyse fonctionnelle du régulateur de vitesse dans le but de recueillir les informations relatives du régulateur, puis nous avons utilisés les réseaux de pétri pour modéliser le système afin de mieux évaluer sa fiabilité prévisionnelle. La modélisation avec les réseaux des pétris nous a permis d'établir la fiabilité des composants critiques, cette dernière modélisation nous a montré comment se comporte le régulateur de vitesse avec le temps. La thématique traitée peut contribuer à mettre sur pied une technique de précision, d'efficacité et permettre d'anticiper sur l'apparition d'une défaillance future.

5. RÉFÉRENCES

- Descartes S., 1997. Lubrification solide à partir d'un revêtement de Mosx conséquences de la rhéologie et des débits de troisième corps sur le frottement. PhD thesis, INSA de Lyon France.
- Doyle R., 1991. Mechanical reliability. In RAMS Tutorial Notes, USA.
- Fort A., Bueno M., Jallais C., 2014. Systèmes d'alerte anti-collision : état de l'art et impact du niveau de fiabilité et du moment de déclenchement''. IFSTTAR - TS2 – LESCOT, Fondation sécurité Routière, Université Lumière de Lyon 2.
- Lalanne C., 1999. Vibrations et chocs mécaniques, Tome 4: Dommage par fatigue. Hermes Science Publications, Paris.
- Malik M., 2004. Sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution en présence de production décentralisée. Thèse de Doctorat soutenue à l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble.
- Mihalache A., 2007. Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué. Thèse de Doctorat soutenue à l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers.
- Noll N., 1997. Conception et naissance d'un contact tribologique'', PhD thesis, INSA de Lyon, France.
- Procaccia H., Fertou E., Procaccio M., 2011. Fiabilité et maintenance des matériels industriels réparables et irréparables. Ed. Tec&Doc Lavoisier, 527p.