

IMPACT DE L'UTILISATION D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE DES DEFAILLANCES SUR LES COÛTS D'EXPLOITATION ET DE MAINTENANCE DES MECANIKES D'HELICOPTERES ¹

Mathieu Glade*, Jean-Yves Longère**, Patrick Lyonnet***

Résumé. - Les coûts de maintenance des hélicoptères représentent une part particulièrement importante du *life cycle cost*. Aussi l'optimisation de ces coûts est-elle un enjeu majeur dans ce secteur concurrentiel de l'aéronautique. Des méthodes et des moyens de maintenance sont donc développés actuellement pour permettre d'évaluer et de diminuer ces coûts [GLA 02]. En parallèle, pour les hélicoptéristes, les recherches en sûreté de fonctionnement cherchent à améliorer la sécurité des appareils. Aussi se sont développés dans les dernières années les systèmes de surveillance HUMS (*health and usage monitoring system*) analysant sur les mécaniques des paramètres techniques tels que les niveaux vibratoires, les températures de fonctionnement, les couples sur un arbre... Ceux-ci permettent aujourd'hui d'améliorer la sécurité du vol par la détection précoce et le suivi de la dégradation des éléments critiques. Aujourd'hui arrivé à maturité technique dans sa fonction sécuritaire, le HUMS poursuit son développement dans un objectif d'optimisation des coûts de maintenance. Les systèmes de détection de panne pourraient en effet offrir une alternative aux modes de maintenance classiques : la maintenance préventive, où les éléments maintenus sont remplacés par anticipation et n'atteignent pas leur potentiel de vie réel, et la maintenance corrective, où les défaillances apparaissent de façon aléatoire et entraînent un processus de remise en état particulièrement fastidieux [LAR 99]. Le HUMS doit donc permettre, par son analyse de dégradation, par le diagnostic de panne, par le pronostic de défaillance (anticipation de panne) et par la surveillance de l'utilisation, de mettre en œuvre une maintenance optimisée et à moindre coût. Cet article présente ainsi les moyens envisagés pour améliorer la maintenance à

¹Cet article a fait l'objet d'une publication dans le colloque francophone PENTOM 2003.

* Ingénieur doctorant. Life Cycle cost optimisation. Eurocopter.

** Responsable du service maintenabilité et coûts d'exploitation. Eurocopter.

*** Professeur, Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes. Ecole Nationale d'Ingénieur de Saint-Etienne.

l'aide d'un HUMS. Il évoque tout d'abord les principales fonctionnalités de l'HUMS, puis indique dans quelle mesure il est un vecteur d'optimisation de maintenance, et enfin présente les méthodes utilisées pour quantifier l'impact de l'utilisation d'un système de surveillance des défaillances sur les coûts d'exploitation.

Mots-clés : *Monitoring system, Direct Maintenance Cost, analyse vibratoire, coût d'usage.*

1. Introduction

Aujourd'hui, la maîtrise des coûts d'exploitation est un enjeu commercial majeur dans le domaine de l'aéronautique, la maintenance intervenant comme la part principale dans le coût de cycle de vie des hélicoptères. EUROCOPTER mise donc sur une force de développement et d'innovation importante visant à mettre en œuvre des moyens d'optimisation de maintenance. [LON 01]. Dans ce but, les systèmes de surveillance d'éléments mécaniques d'hélicoptère ajoutent à leur objectif de suivi sécuritaire de l'appareil un rôle d'optimisation des coûts d'exploitation. En effet, il semblerait que leur utilisation doive permettre une diminution des coûts de maintenance pour des raisons aussi diverses que l'amélioration de fiabilité, l'anticipation sur la maintenance ou encore la surveillance des conditions d'usage.

Cet article a donc pour objectifs d'une part de montrer les améliorations potentielles d'un système de monitoring sur la maintenance, et d'autre part d'exposer les moyens d'estimer ces gains de manière préventive. [LYO 99].

2. Présentation du système de monitoring HUMS

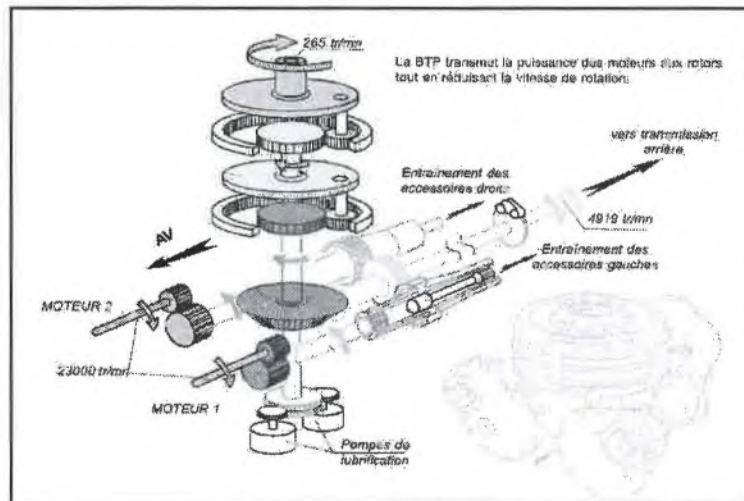


Figure 1 : Mécanique d'hélicoptère.

Le HUMS, pour Health Usage Monitoring System, est un système qui permet la surveillance des ensembles mécaniques et des moteurs, éléments prépondérants de l'appareil, tant en termes de sécurité qu'en termes de coût de maintenance (plus de 50% des coûts directs de maintenance - DMC- total des appareils.)

Créé à l'origine dans le but d'améliorer la sécurité du vol par la détection précoce de la dégradation des éléments critiques, on lui attribue maintenant également le rôle d'optimiser la maintenance des appareils, en visant à terme un processus basé non plus sur des révisions forfaitaires, mais sur l'endommagement réel de la machine, lié à l'utilisation spécifique qui en est faite (concept de maintenance selon l'état).

Parallèlement à cela, ce système permet au constructeur d'améliorer sa connaissance de l'utilisation des appareils par ses clients, et de faciliter l'analyse des défaillances survenant en exploitation. [POU 01]

2.1. Description technique du système

Les informations provenant des différents capteurs de vol sont collectées et formatées par l'ordinateur de bord. Elles sont ensuite transmises vers la boîte noire pour conserver l'information en cas de crash.

LA BOITE NOIRE : le *Cockpit Voice and Flight Data Recorder* (CVFDR) permet d'analyser les conditions du vol en cas d'accident, en enregistrant les données du vol et les conversations des trente dernières heures. C'est la « boîte noire » de l'hélicoptère.

L'ORDINATEUR DE BORD : le *Aircraft Condition Monitoring System* (ACMS) est la pièce maîtresse du HUMS. Véritable cerveau du système, il collecte, formate et transfère toutes les données du vol.

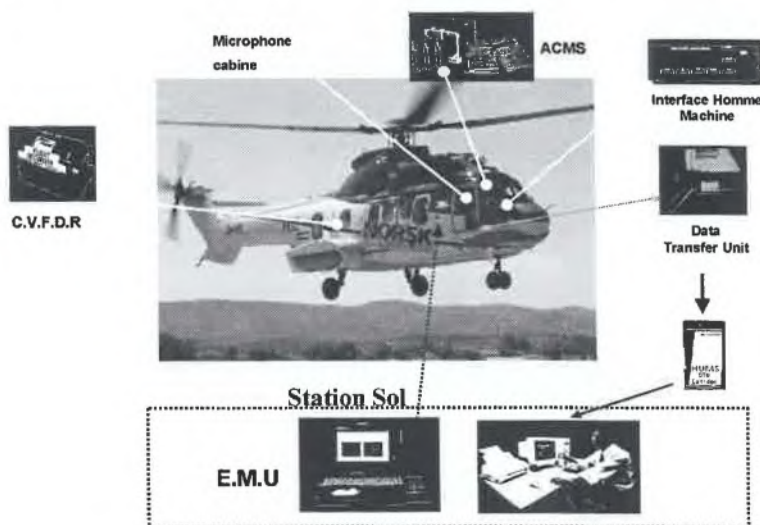


Figure 2 : Architecture détaillée du système.

A la fin de chaque vol, les données enregistrées sont déchargées sur une « station sol » pour être analysées par les équipes de maintenance. Cette analyse doit permettre d'identifier les tâches à réaliser avant le prochain vol et de mettre à jour l'historique de l'appareil. Le système gère cette analyse par l'intermédiaire de deux fonctions principales :

- le système de monitoring recueille des informations techniques provenant de différents capteurs (vibrations, température...) qui sont ensuite déchargées dans une station sol pour être analysées. Cette analyse doit permettre d'identifier les dégradations principales du système grâce aux deux fonctions principales suivantes :
 - une fonction utilisation (partie usage) : c'est l'ensemble de tous les paramètres « compteurs » pouvant caractériser l'utilisation de l'hélicoptère (le temps de fonctionnement, le temps de vol, les cycles...);
 - une fonction santé (partie *Health*) basée sur l'analyse des signaux vibratoires générés par les ensembles mécaniques en fonctionnement.
- la partie « Usage » permet de connaître le spectre d'utilisation de l'appareil, et ainsi de contrôler l'endommagement moyen des hélicoptères, d'améliorer la maintenance programmée et de générer des gains de maintenance sur les pièces à durée de vie. La partie *health* permet quant à elle de renforcer la sécurité, d'augmenter la disponibilité, et d'améliorer les interventions de maintenance corrective. [POU 01]

Dans ce contexte, nous verrons donc au travers de divers pôles d'optimisation comment le système HUMS de détection de pannes peut générer des gains de maintenance.

2.2 Description fonctionnelle du système

La fonction utilisation (Partie « usage ») est définie par l'ensemble de tous les paramètres « compteurs » pouvant caractériser l'utilisation de l'hélicoptère :

- le temps de fonctionnement ;
- le temps de vol ;
- les cycles de couple ;
- les cycles rotor ;
- le nombre d'atterrissages ;
- les puissances moyennes...

Les objectifs de cette fonction usage sont de connaître le spectre d'utilisation de l'appareil, de contrôler l'endommagement moyen des hélicoptères, d'améliorer la maintenance programmée, de générer des gains de maintenance sur les pièces à durée de vie.

La fonction santé (Partie "Health") est basée sur l'analyse des signaux vibratoires générés par les ensembles mécaniques en fonctionnement. La surveillance des pièces mécaniques vitales vise à respecter trois objectifs majeurs :

- renforcement de la sécurité : détection précoce des défauts naissants sur les mécaniques ;
- augmenter la sûreté des missions ;
- permettre des bénéfices opérationnels (réduire la charge de travail des équipes, augmenter la disponibilité des appareils).

La fonction santé est basée sur la mise en place d'indicateurs avec des seuils prédéfinis à ne pas dépasser, indicateurs calculés à partir des signaux vibratoires des pièces surveillées. Chaque dépassement génère une alarme dont l'analyse déclenche les opérations de maintenance. Plus précisément, les indicateurs calculés sont définis pour être sensibles à l'apparition de défauts sur les pièces mécaniques.

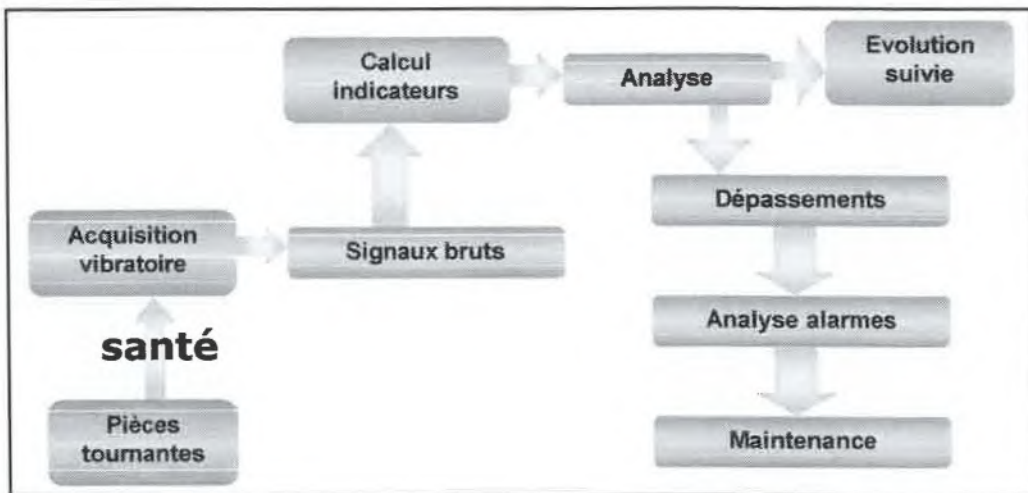


Figure 3 : Synopsis du système « santé ».

3. Impact sur les coûts d'exploitation

Dans ce contexte, l'objectif est d'estimer l'impact sur les coûts d'exploitation si on procède à l'installation d'un système HUMS sur un hélicoptère. Cette étude présente différents intérêts : vérifier que le système HUMS peut générer des crédits de maintenance, donner des arguments supplémentaires au département des « ventes » dans la diffusion de ce système, confirmer l'intérêt de la « recherche » pour continuer à développer de tels systèmes.

3.1 Méthodologie

Une pré-étude avait été menée en 2000, dans laquelle avait été identifié un certain nombre de pôles de gains potentiels. Ces différents pôles sont les suivants :

- le pôle diagnostic fait référence à la fonction diagnostic du HUMS qui permet aux utilisateurs de détecter les pannes, leur évolution et leur localisation. Cette fonction offre des possibilités pour diminuer la maintenance préventive qui malgré tout reste une maintenance assez onéreuse. Il est important de noter que l'installation d'un tel système ne modifie en rien la fiabilité intrinsèque des autres équipements ;
- le pôle pronostic est basé sur la capacité du HUMS à détecter prématurément les pannes. L'anticipation des pannes permet très probablement de gérer au plus juste les stocks et d'augmenter légèrement la disponibilité des appareils ;
- le pôle assurance : l'installation d'un HUMS permettrait de réduire les primes d'assurance puisqu'il augmente la sécurité de l'appareil ;
- le pôle comptage des heures de vol : un gain en coût de cycle de vie est escompté par un meilleur comptage de l'usage machine en comparaison du comptage manuel des heures de vol effectuées ;
- le pôle moteur : la surveillance d'indicateurs sur les moteurs peut permettre de limiter les fausses déposes et donc de diminuer les coûts de maintenance.

L'étude d'un tel système peut être vu de manière très large ; par conséquent, il est indispensable de poser certaines limites : l'étude décrite porte donc sur les hélicoptères Super Puma dans le cadre d'usages tant civils que militaires. Le Super Puma est un appareil lourd qui peut transporter 20 personnes dont deux pilotes à 280 km/h. Certifié « tous temps », il évolue dans tous les pays du monde pour des missions aussi diverses que le transport de passagers sur plate-forme offshore ou le transport de passagers VIP ou encore toutes missions militaires navales ou terrestres.

3.2 Impact en maintenance du système de détection de pannes

Comme nous l'avons présenté précédemment, l'analyse des gains potentiels du système HUMS s'articule autour des pôles de gains potentiels suivants : le pôle diagnostic, le pôle pronostic, le pôle surveillance qui doit permettre de limiter les déposes non justifiées, et donc de limiter les coûts de maintenance, enfin, la surveillance de l'usage qui doit engendrer des gains. Nous montrerons également que les systèmes de détection de pannes peuvent engendrer un gain sur le coût de cycle de vie hors maintenance, un HUMS permettant d'augmenter la sécurité des appareils doit par exemple permettre un gain potentiel sur les primes d'assurances.

3.2.1 Diagnostic

Basé sur la fonction santé du HUMS, le diagnostic permet d'étudier l'apparition des pannes, leur évolution et leur criticité. Une telle fonction doit permettre des gains en maintenance préventive ou en maintenance corrective.

La maintenance préventive des éléments mécaniques (révision) est réalisée périodiquement selon les données certifiées du constructeur. Or, pour des raisons de sécurité, les périodicités établies sont particulièrement contraignantes. Le fait de disposer d'un système contrôlant l'état des mécaniques en continu permet donc d'augmenter les échéances de maintenance tout en conservant le niveau de sécurité recommandé. [FOR 01]. Notons que cette démarche de gain n'a pas pour objectif d'améliorer la fiabilité intrinsèque, mais uniquement de l'exploiter plus qu'elle ne l'est aujourd'hui en atteignant le potentiel réel des équipements.

En première approche et en raison du manque d'informations, pour évaluer le gain en fonction de l'augmentation des potentiels des éléments, plusieurs hypothèses sur le coût des révisions sont à faire : dans une hypothèse basse, on considèrera que le coût moyen d'une révision reste constant malgré l'augmentation des TBO (*Time Between Overall*) ; alors que, dans une hypothèse haute, on prendra pour le coût d'une révision celui d'un échange standard.

L'étude est réalisée pour des coûts de maintenance non programmée croissant avec l'augmentation des potentiels.

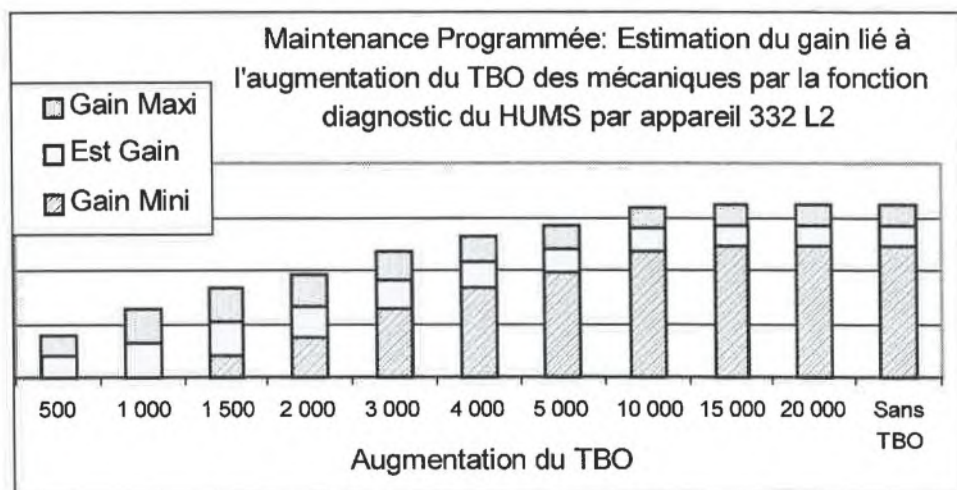


Figure 4 : Gain en maintenance programmée.

On procède à une analyse itérative des coûts en observant le gain potentiel en maintenance en fonction de l'augmentation du TBO par palier de 500 heures de la valeur actuelle jusqu'au MTBF (*Mean Time Between Failure*) de l'équipement. Le coût global de la maintenance est la somme du coût de la révision générale et du coût de la maintenance non

programmée. Le gain est alors facilement observable par comparaison entre le coût obtenu et le coût actuel.

S'il est clair que le gain maximal se fait pour une augmentation maximale de la maintenance programmée, il est également évident que l'effort nécessaire pour atteindre le gain maximum sera particulièrement important.

Aussi la mise en place d'un ratio gain / efficacité doit-elle nous permettre de connaître ce qu'il serait raisonnable et probable d'atteindre. Nous définirons donc l'efficacité comme le quotient de la probabilité de réalisation et de l'effort à fournir pour y parvenir, notion évaluée par avis d'expert.

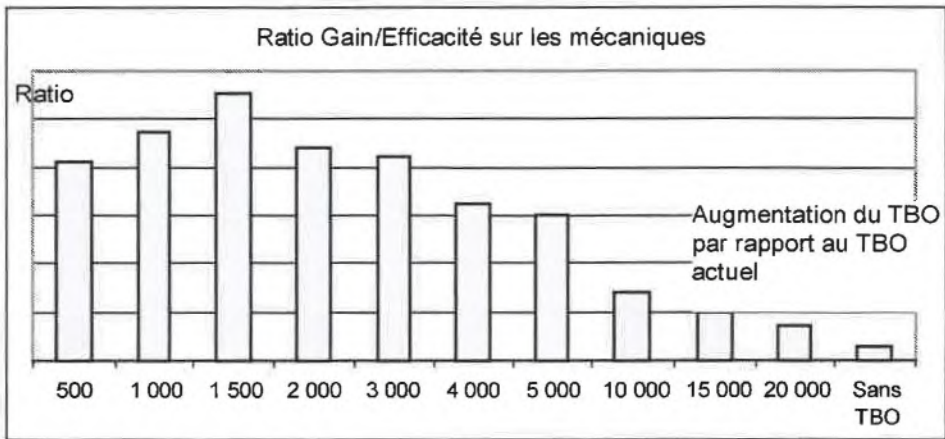


Figure 5 : Ratio gain efficacité.

On note dans cet exemple un maximum aux environs de 1500 heures, cela signifie que le plus intéressant au niveau du gain serait de pouvoir exploiter les équipements 1500 heures de plus.

Le taux d'atteinte du potentiel des équipements représente la proportion d'équipements atteignant la maintenance préventive (le TBO). Cette valeur proche de 70 % pour les mécaniques engrenantes montre l'importance non négligeable de la maintenance corrective (30% des opérations de maintenance). Or, on pense qu'une fonction de diagnostic, par sa détection et son suivi des pannes, peut permettre d'augmenter le taux d'atteinte. [FOR 01]

Le principe est que le HUMS peut permettre de repousser le MTBF et donc d'augmenter le taux d'atteinte à TBO en restant dans des conditions de sécurité suffisantes. Nous faisons ici l'hypothèse que l'apparition des pannes ou des défaillances suit une loi de Weibull.

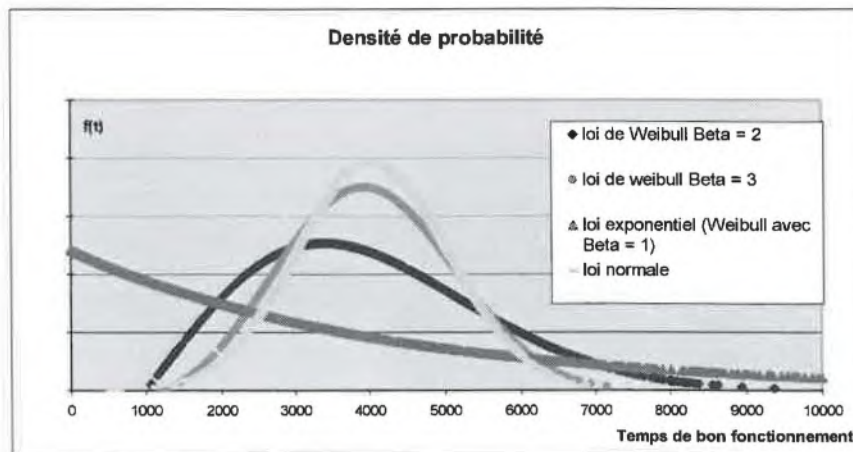


Figure 6 : Représentation de la répartition des pannes par une loi de Weibull.

La loi de Weibull, de la forme $R(t) = e^{-((\frac{t-\delta}{\eta})^\beta)}$ est un modèle permettant une bonne représentation de la probabilité de défaillance en fonction du temps. Dans cette équation, le terme β va être révélateur du type de comportement en fiabilité : plus β est important, plus la courbe de défaillance représente un phénomène de vieillissement. Pour un β de 1, le modèle représente une probabilité de défaillance constante au cours du temps. Etant donné que cette analyse porte sur des éléments mécaniques (élément à vieillissement), nous partirons sur un β compris entre 1,7 et 2.

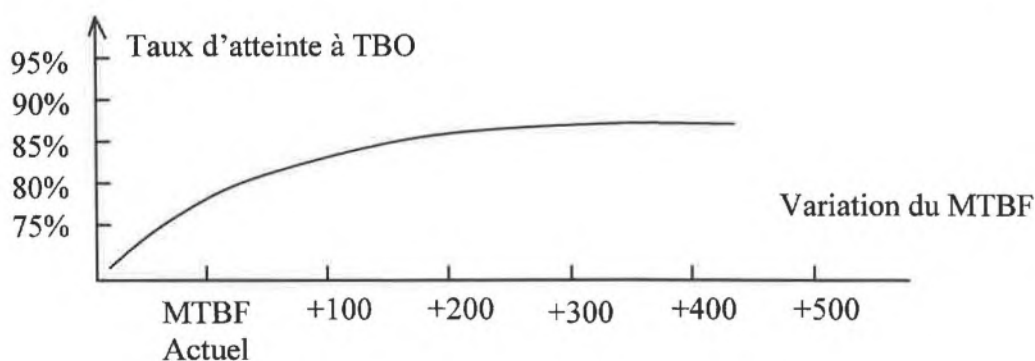


Figure 7 : Variation du MTBF en fonction du taux d'atteinte à TBO.

On fait l'hypothèse que les coûts de maintenance non programmée sont nuls lorsque le taux d'atteinte à TBO est de 100%. On suppose également que la variation de ces coûts est linéaire. Cette approximation se justifie par le graphique suivant.

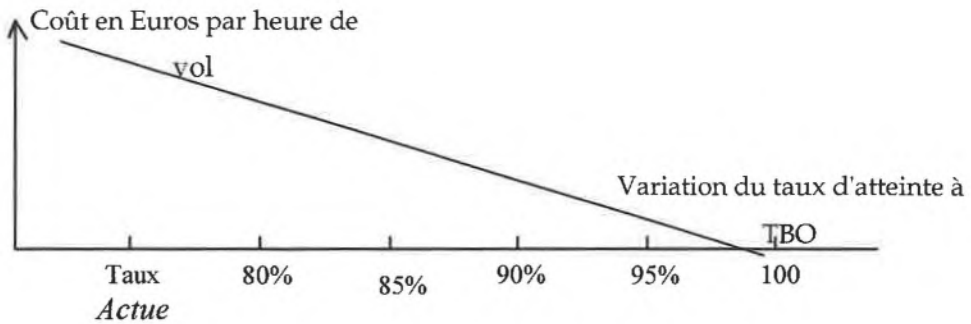


Figure 8 : Coût en fonction de la variation du taux d'atteinte à TBO.

De même que précédemment, on associera une probabilité de réalisation et un effort à fournir pour estimer le gain probable en maintenance non programmée. Ce gain en maintenance sera d'autant plus important que le taux d'atteinte de la maintenance programmée est faible.

3.2.2 Pronostic

Le pôle pronostic est basé sur les capacités d'anticipation de pannes du système HUMS : en suivant l'évolution des différents indicateurs, le système doit être capable de prédire les défaillances avec un temps d'avance. Bien que tous les modes de pannes ne soient pas détectables par monitoring, il semble que cette capacité d'anticipation permettrait de réduire les stocks de rechanges et d'augmenter dans le même temps la disponibilité. [POU 00]

L'analyse de ses gains reste particulièrement dépendante de l'usage et de la dimension des flottes étudiées ou des modes de maintenance des opérateurs. En effet, les stocks de rechange sont dimensionnés en fonction de différents paramètres que sont la fiabilité des équipements, la maintenance programmée et non programmée, les délais de livraison, la taille de la flotte et la fréquence de vol.

La détection prématurée des pannes influe sur la maintenance non programmée. Aujourd'hui, la capacité d'anticipation envisagée devrait permettre aux opérateurs les plus contraignants de commander la pièce avant la défaillance effective. Le stock immobilisé serait ainsi réduit et la disponibilité augmentée.

L'estimation de ce gain est basée sur l'hypothèse que les sommes immobilisées étaient empruntées. Par conséquent, les gains sont représentés par l'économie des intérêts de cet emprunt.

Nous traitons ici l'indisponibilité liée à la maintenance non programmée, c'est-à-dire le cas où un appareil reste au sol en raison d'une défaillance. Une panne entraîne de

l'indisponibilité par son temps de réparation mais aussi et surtout par la disponibilité des rechanges.

Dans le cas où le stock de rechanges est réduit, le HUMS peut permettre d'anticiper les commandes de rechanges. Cependant, ces indisponibilités ont une fréquence d'apparitions relativement faibles en raison de MTBF élevé en regard du TBO. Les gains potentiels en disponibilité ne sont donc pas les plus significatifs.

3.2.3 Analyse de l'usage

Actuellement le comptage des heures de vol est effectué manuellement par le pilote, ce qui est une source d'incertitude. En effet, il peut y avoir des approximations dans ce comptage, non pas par malveillance mais par simplicité (on note 60 min pour 57 min par exemple).

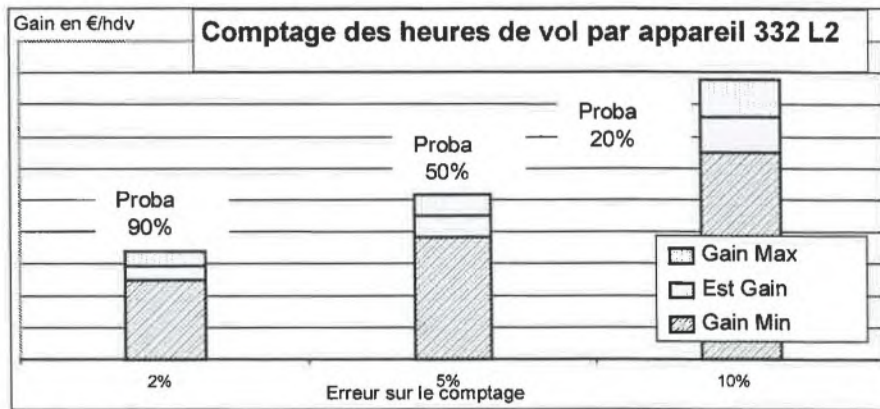


Figure 9 : Comptage des heures de vol.

Cette erreur a une incidence directe sur la périodicité de maintenance des appareils. Le rétablissement des périodicités préconisées par comptage automatique pourrait donc entraîner un gain non négligeable. Bien entendu, les erreurs de comptage des heures de vol sont toujours en défaveur de la maintenance. En effet, pour des raisons de sécurité, le pilote qui effectue le comptage ne peut se permettre de sous estimer les heures réellement effectuées. [POU 01]

Cette analyse est basée sur des hypothèses concernant la marge d'erreur qu'il peut y avoir dans la comptabilisation des heures. Selon expert, cette erreur pourrait aller de 1 à 10 % du total des heures en fonction entre autres des profils de mission : les longues missions auront probablement des erreurs plus faibles que les missions courtes. [POU 01]. On peut penser qu'actuellement la majorité des flottes se trouve dans la fourchette d'erreurs de 1 à 5%, ce qui représente un gain particulièrement important en coûts de maintenance.

3.2.4 Pôle assurance

L'amélioration de la sécurité grâce à l'utilisation d'un HUMS sur un appareil ne peut avoir qu'un effet bénéfique sur la prime d'assurance.

En effet, une étude de l'impact possible du HUMS sur les accidents nous a montré une diminution significative du risque. Nous avons donc estimé la réduction potentielle des primes d'assurance en fonction d'une proportion de la valeur du risque. Ce gain nécessite cependant un important changement de mentalité et ne semble intéressant qu'à long terme.

4. Conclusion

La synthèse des gains que pourrait engendrer un système de surveillance HUMS sur les coûts d'exploitation se présente comme suit sur la figure 10.

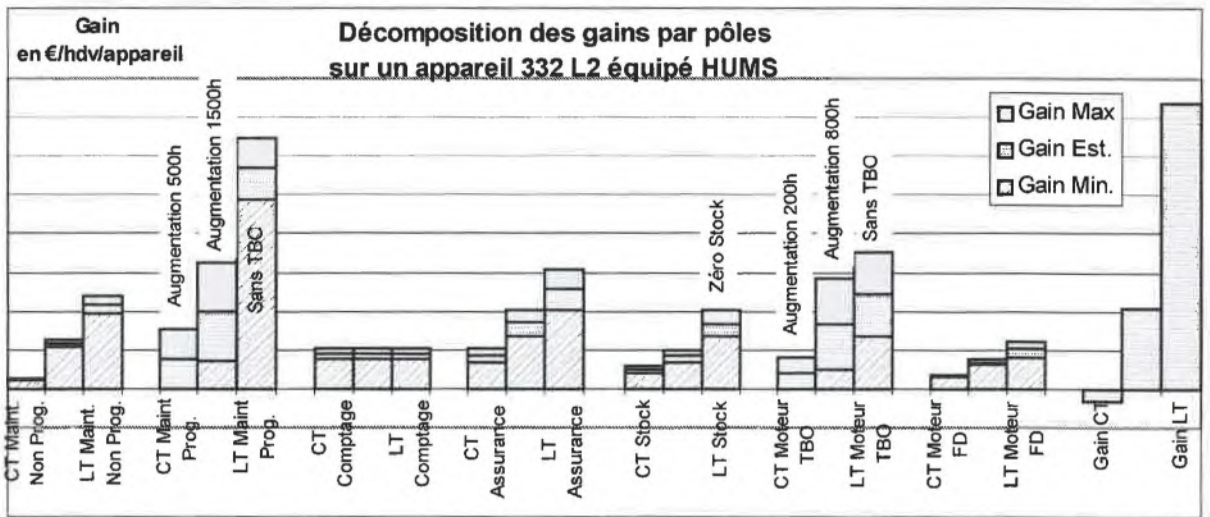


Figure 10 : Bilan des gain du HUMS sur le LCC d'un hélicoptère.

Ce graphique nous fait donc apparaître le potentiel en maintenance d'un système de surveillance d'éléments mécaniques. Si les pétroliers et les chimistes utilisent déjà ces méthodes pour la maintenance de leurs installations (pompes, vannes...), proposer de tels produits pour les hélicoptères semble autrement plus difficile. En effet, les difficultés pour réaliser de l'analyse vibratoire sur l'environnement vibrant qu'est un hélicoptère, associées aux lourdes exigences sécuritaires font qu'il reste difficile d'effectuer aujourd'hui des gains en maintenance avec un tel produit.

On peut donc conclure qu'à très court terme le système devrait encore représenter un coût pour l'utilisateur, et c'est à moyen terme que la rentabilité d'un tel système en maintenance devrait se concrétiser. A long terme, le système serait même une source de gain important, cependant les hypothèses sont fortes et impliquent de lourds changements dans les politiques et dans la perception de la maintenance aéronautique.

Enfin, il apparaît que les incertitudes sur l'estimation des gains en coûts de maintenance restent importantes. S'agissant de projet en développement sur lequel aucun précédent n'existe, il semble en effet difficile d'améliorer la prévision proposée. Aussi les prochaines études se baseront-elles plus sur des études fonctionnelles et sur les gains potentiels engendrés par les différents éléments du HUMS.

5. Bibliographie

- [POU 01] Pouradier J-M ; Trouve M. *An assessment of Eurocopter experience in HUMS development and support..* Acte de colloque. 2001. 7 pages
- [POU 00] Pouradier J-M, *HUMS for Eurocopter light and medium helicopters ; 26th European rotorcraft forum.* La Hague. Netherlands. Sept 2000
- [LAR 99] Larder B, Hughes S, *Helicopter HUM/FDR Benefit and developments ; American Helicopter Society 55th Annual Forum, Montreal, Quebec, Canada, 25-27 May 1999.*
- [FOR 01] Forsyth G.F ; *Workshop on helicopter health and usage monitoring systems, Melbourne, Australia; Fev 2001.*
- [GLA 02] Glade Mathieu, Longère Jean-Yves, Patrick Lyonnet ; *Conception de modèles paramétriques de coûts de maintenance d'un système complexe en bureau d'étude; Amameth Tunisie SMC 2002*
- [LON 01] Longère J-Y, Domenge S, Leroy J ; *Méthodologie pour la maîtrise des coûts opérationnels.* Phoebus 2001.40 pages
- [LYO 99] Lyonnet P ; *La maintenance, mathématiques et méthodes.* Lavoisier, tech et doc. Paris : 1999. 390 pages.