



HAL
open science

Gestion de la durée de vie d'un système électronique : extension de la durée de vie

Martial Schaff, Darrigade Didier, Mehdi Ait-Ighil

► **To cite this version:**

Martial Schaff, Darrigade Didier, Mehdi Ait-Ighil. Gestion de la durée de vie d'un système électronique : extension de la durée de vie. Congrès Lambda Mu 22 " Les risques au cœur des transitions " (e-congrès) - 22e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2020, Le Havre(e-congrès), France. <hal-03347979>

HAL Id: hal-03347979

<https://hal.science/hal-03347979v1>

Submitted on 17 Sep 2021

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.



HAL Authorization

Gestion de la durée de vie d'un système électronique : extension de la durée de vie

Estimation of the lifetime of an electronic system in case of a lifetime extension

SCHAFF Martial
Thales Alenia Space
Toulouse, France

AIT IGHIL Mehdi
Thales Alenia Space
Toulouse, France

DARRIGADE Didier
AKKA Technologies
Blagnac, France

Résumé - Cet article étudie le phénomène de vieillissement des systèmes électroniques, en particulier dans le domaine spatial, en vue d'une extension de leur durée de vie. Différentes approches sont abordées afin de sécuriser cette période d'extension, via la surveillance et la modélisation ou le développement d'une fonction de maintenance prédictive.

Summary – This article studies the ageing phenomenon for the electronic systems, in particular in the spatial domain, in view of a lifetime extension. Different approaches are tackled in order to secure this extension period, through the monitoring and the modeling or the development of a function of preventive maintenance.

Mots clefs – *Durée de vie, Vieillesse, Maintenance prédictive, Sûreté de Fonctionnement, Spatial*

I. CONTEXTE

Les systèmes aéronautiques, spatiaux, ou militaires sont généralement conçus pour une durée de vie de 15 à 30 ans (par exemple, un avion vole typiquement plus de 25 ans), d'où une problématique pour les industriels de maintenir ces systèmes en condition opérationnelle, voire d'en étendre la durée de vie initiale pour des raisons économiques ou écologiques. En effet, si la durée de vie peut être spécifiée pour un système, ça n'est habituellement pas le cas pour les produits qui le composent.

Nous distinguerons à ce stade la durée de vie et le MTBF (Mean Time Between Failure) qui sont 2 notions complémentaires souvent confondues.

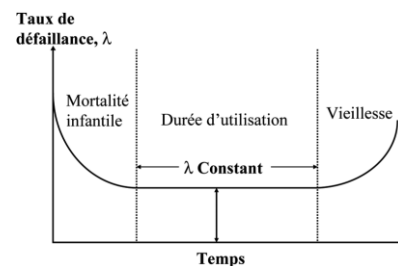


Figure 1 : Cycle de vie typique d'un composant

En effet, le MTBF des composants et produits est calculé pour ce type de système selon les normes en vigueur sur le projet, par exemple la MIL-217-F-N2 pour les systèmes militaires. Celle-ci établit et maintient des méthodes d'estimation de la fiabilité intrinsèque des composants (MTBF), i.e. due aux pannes aléatoires d'un design mature pour l'électronique militaire (voir : Cycle de vie typique d'un composant Figure 1).

Alors que la durée de vie est une caractéristique imposée par la mission et obtenue par le design du système, mais aussi via une stratégie de pérennisation basée essentiellement sur la maintenance préventive, la constitution de stocks de rechanges, et la gestion de l'obsolescence.

En effet, la durée de vie des équipements est beaucoup plus courte que celle du système, impliquant une gestion de l'obsolescence qui passe par une veille technologique permettant de repérer les fins de vie (End of Life) ainsi que les dernières possibilités d'achats (Last Buy Order). Cette gestion est illustrée par la Figure 2 : le système est composé de produits et de composants (équipements) qui ont une

durée de vie intrinsèque très inférieure à celle spécifiée pour le système.

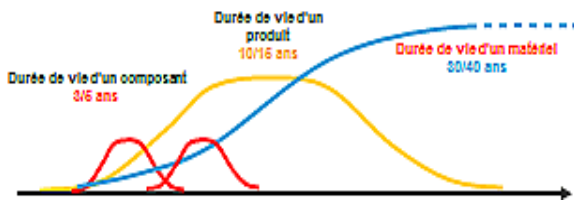


Figure 2 : Illustration des durées de vie

L'étude est basée sur l'expérience de Thales Alenia Space dans le développement et l'opération de ces grands systèmes critiques intégrant un segment spatial, composé d'un ou plusieurs satellites, couplé à un segment sol mettant en réseau diverses infrastructures et équipements déployés au sol. On peut citer par exemple des projets dans le domaine de la navigation par satellites ou des télécommunications militaires en exploitation depuis plusieurs années.

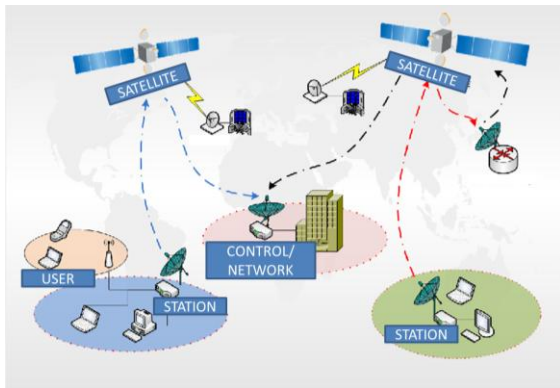


Figure 3 : Exemple d'architecture d'un système Satellitaire

Les systèmes aéronautiques, spatiaux, ou militaires étant typiquement conçus pour une durée de vie de 15 à 30 ans, la problématique du vieillissement des équipements électroniques se pose par conséquent sachant que la durée de vie d'un système est établie au départ du projet, et la possibilité d'extension n'est généralement pas prévue de façon explicite. On pourrait alors observer une multiplication des pannes liées au vieillissement et une incapacité à renouveler les stocks en raison d'une obsolescence de fabrication et d'une limite atteinte sur les moyens de maintenance. L'occurrence de ce phénomène empêcherait la fourniture d'un service en continu voire le paralyserait totalement, donc il doit être anticipé dans un contexte d'extension de la durée de vie. En effet, les stocks de rechange diminuent, et le remplacement des équipements obsolètes nécessite une requalification qui peut prendre des années et dont le prix est élevé. D'où le recours par exemple à la cannibalisation d'équipements anciens, et à l'utilisation prolongée du système en l'état. L'intérêt d'identifier et de prévenir les éventuels phénomènes de vieillissement est donc évident, et cette étude a pour objectif la mise en place de la surveillance de ces phénomènes au travers d'indicateurs techniques de détection de la fin de vie.

La présente étude est organisée comme suit.

1. (§II) L'état de l'art des études de durée de vie des équipements à base de cartes électroniques a été exploré. Les cas de pannes liés au vieillissement, observés sur les systèmes opérationnels via des processus de suivi du type Service Après-Vente (SAV) ou Retour d'Expérience (REX) ont également été répertoriés.

2. (§III) Ce processus de suivi n'étant pas suffisant pour les équipements concernés par la phase d'extension de durée de vie, des analyses spécifiques (modèles de Weibull) peuvent être menées sur les équipements à risque.

3. (§IV) Les analyses ci-dessus sont en général limitées aux pannes franches ou ayant un impact direct sur la mission. Les différents signaux de maintenance ont donc été étudiés (forts, faibles, indirects) afin d'illustrer la possibilité de mieux surveiller l'évolution de l'état du système et de permettre la détection de phénomènes de dégradation tels que ceux liés au vieillissement.

4. (§V) Le thème de la maintenance prédictive a été abordé, dans la continuité de la section précédente, essentiellement avec une visée prospective néanmoins prometteuse à ce stade.

II. ETAT DE L'ART ET OBSERVATIONS

Il est généralement considéré que les composants électroniques sont utilisés durant leur période de maturité (MTBF constant), c'est-à-dire que les phénomènes de mortalité infantile et de vieillesse peuvent être négligés, grâce au déverminage et à une durée d'utilisation limitée.

Pour les systèmes en vol ou en orbite, l'effet du vieillissement est couvert au niveau de la conception et de la qualification (analyses pire-cas et de derating) par la prise en compte des phénomènes de dégradation classiques tels que : le cyclage thermique, les dérives, l'effet dû au cumul de radiations, les cycles ON/OFF... En général, seule la durée de vie initiale est couverte.

Pour les systèmes déployés au sol, la période de vieillissement est généralement exclue des méthodologies, par ex. NRPM (cf. [1]), considérant que celle-ci intervient en général bien au-delà de la durée de vie utile des systèmes électroniques. Cette exclusion n'exonère néanmoins pas de la mise en place des stratégies de maintenance visant à combler le gap entre le MTBF des composants les plus faibles et la durée de vie.

C'est le cas notamment de certains composants dont le phénomène d'usure est bien connu et doit être compensé par des actions de maintenance préventive régulières. Ainsi par exemple, les batteries, ventilateurs, disques durs ou SSD limités en nombre de cycle de lecture/écriture doivent être échangés tous les 5 ans. De même, les composants déployés en extérieur et soumis à des conditions de température ou d'humidité défavorables doivent être surveillés : antennes ou autres composants soumis à corrosion par exemple.

Concernant les autres composants (cartes électroniques, alimentations, connecteurs...), leur durée de vie n'est pas connue à l'avance, d'où l'intérêt de suivre l'évolution de leurs défaillances notamment lorsque les composants sont en service depuis plus de 10 ans, en incluant les phases initiales de test et de qualification. Ainsi, la surveillance opérationnelle des systèmes, dont les équipements sont utilisés depuis plus d'une dizaine d'années en opérations,

permet de détecter de nombreux cas de pannes électroniques liés au vieillissement.

Par exemple, on peut observer sur des cartes CPU des ralentissements des temps de montée/descente et des courants inrush trop élevés dus au vieillissement et causant le dysfonctionnement de l'équipement. La figure ci-dessous illustre parfaitement ce phénomène de vieillissement.

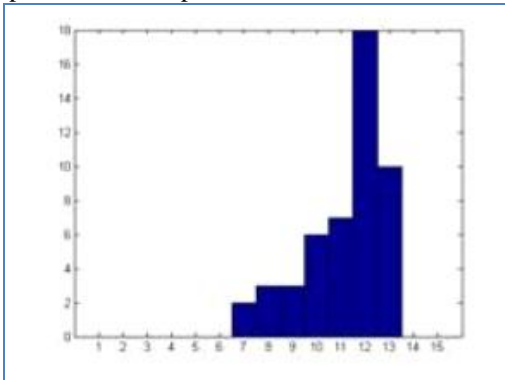


Figure 4 : Nombre de pannes annuel d'un type de composants montés sur des cartes CPU

On a aussi pu constater la différence de comportement entre 2 récepteurs fabriqués avec 7 ans d'écart et soumis à des conditions extrêmes de puissance reçue. En effet, des tests dédiés ont montré que le récepteur le plus récent, et donc le moins utilisé, parvient à acquérir au moins 1 satellite avec un taux de réussite 2 fois plus élevé que le récepteur le plus ancien. On peut citer aussi des cartes électroniques qui ont montré des problèmes de boot dus à des pins corrodées.

Ou encore des auto-resets liés à des disques durs ayant plus de 5 ans, ou à des alimentations ayant faibli. Ainsi, les observations confirment l'existence de phénomènes isolés de vieillissement sur tous les types de cartes électroniques (numérique, analogique, radiofréquence). Néanmoins, sachant que la majeure partie des équipements de ces systèmes ont été en phase de test/qualification puis en service opérationnel pendant de nombreuses années, les observations formellement liées à l'usure peuvent être considérées comme étant en nombre limité à ce jour.

Cependant, des cas sont attribués régulièrement à des causes matérielles inconnues et souvent résolues par le remplacement de la carte défectueuse. Ce constat positif doit donc être modéré.

III. SURVEILLANCE

La surveillance régulière des taux de panne des équipements permet de juger également de l'apparition de phénomènes d'usure. Dans le cadre de la maintenance et du maintien de la qualification du système, les MTBFs peuvent être mesurés une ou plusieurs fois par an. Cette surveillance de haut niveau ne montre pas forcément d'équipements ayant des signes de fin de vie. Certains ont une évolution décroissante du MTBF (voir figure 5), et peuvent être analysés plus finement à l'aide de modèles de vieillissement.

La figure 5 montre le MTBF observé (en bleu), le MTBF calculé (en jaune), et le nombre de défaillances cumulées (en barchart) pour 2 équipements du segment sol de Type A et B.

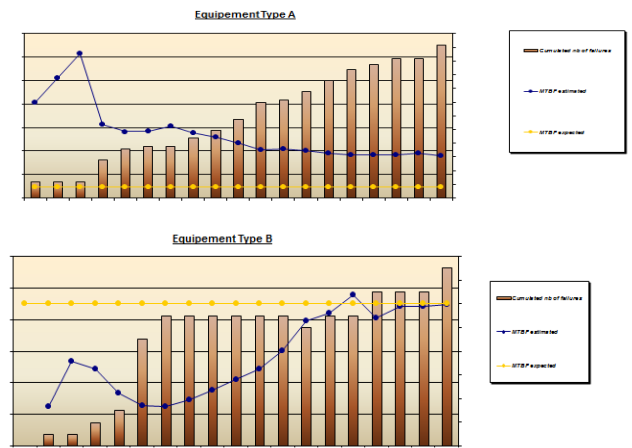


Figure 5 : Défaillances cumulées (monitoring)

Des analyses spécifiques ont été menées sur les équipements à risque afin de détecter des paramètres d'usure par des méthodes statistiques éprouvées (Wayne-Nelson, Kaplan-Meyer, Johnson, Bayes - cf. [4] et [5]).

Ces méthodes permettent d'intégrer à la fois les échantillons morts et censurés à la date T pour calculer la fonction de longévité $P(X < x)$ représentée ci-dessous. La courbe bleue montre la courbe théorique de WEIBULL avec le MTBF observé à partir des défaillances cumulées de la figure 5 et la courbe en violet la courbe théorique de WEIBULL avec le MTBF déduit des méthodes de vieillissement.

Dans ce cas, aucun vieillissement n'est identifié par ces méthodes ($\beta < 1$). L'étude révèle plutôt dans ce cas des pannes de jeunesse.

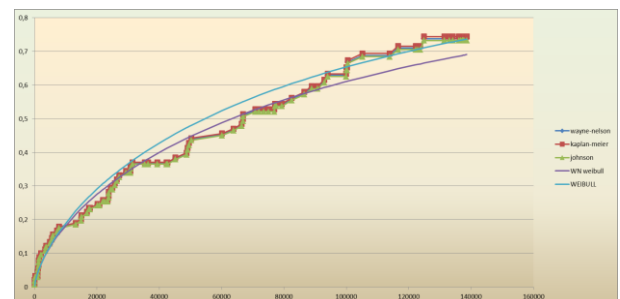


Figure 6 : Fonction de longévité pour un équipement de réception satellitaire A

Le même exercice a été effectué pour un autre type d'équipements à risque (type B), et on voit sur la fonction de longévité une différence notable sur le démarrage de la courbe dont la pente est nettement plus aplatie que pour le type A.

Le vieillissement n'est pas encore nettement caractérisé par le beta (β légèrement > 1) sur ce cas. Ces équipements n'étant en service que depuis 7 ans en moyenne, alors que le MTBF calculé avec les méthodes de Weibull indique un MTBF supérieur à 10 ans, ce résultat n'est pas surprenant.

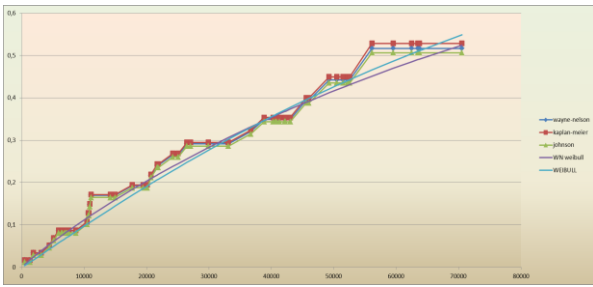


Figure 7 : Fonction de longévité pour un équipement de réception satellitaire B

L'adéquation des modèles de Weibull de paramètres (β , λ) aux données observées est notamment confirmée par un test du Khi2 réalisé sur la densité de probabilité (figure 8). Ce test est positif à l'hypothèse H_0 , $T\chi^2$ étant largement inférieur au quantile $\chi^2(1-\alpha)$.

Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson est également proche de 1, montrant une répartition correctement linéaire en échelle log-log.

Loi	coefficient de corrélation linéaire de Pearson	test du Khi2 vs données observées
	Weibull (nuage de points en log-log)	Weibull (densité de probabilité)
Type A (MTBF=95000h, facteur de forme=0,8)	0,975	8,15
Quantile d'ordre 95%		12,59
Type B (MTBF=90000h, facteur de forme=1,1)	0,98	7,2
Quantile d'ordre 95%		9,94

Figure 8 : Adéquation des modèles de Weibull

Le principe de la méthode de suivi du vieillissement consiste donc ici à surveiller régulièrement, 1 ou 2 fois/an, les durées de vie des équipements à risque, en service depuis plus de 5 ans.

Ensuite, de calculer les paramètres de Weibull et leur adéquation à l'aide des méthodes évoquées ci-dessus et d'en déduire l'apparition éventuelle d'un phénomène de vieillissement à partir des paramètres à la date T et de leur évolution. La densité calculée pour le test du Khi2 doit aussi faire apparaître une augmentation du nombre de défaillances dans la zone du MTBF de Weibull.

Cette approche permet de surveiller l'évolution du système, mais dans le cas de l'extension de la durée de vie il est nécessaire de prévoir celle-ci dans l'ensemble des stocks (maintenance préventive et obsolescence) en intégrant également le risque de vieillissement pour les équipements dont le MTBF se situe dans la période d'extension.

Cas test : à titre d'illustration de la méthode, un cas test a été considéré : un parc de 50 équipements ayant chacun un MTBF de 10 ans, suivant une loi exponentielle puis une loi de Weibull avec un beta de 3. Un modèle additif de Bertholon (cf. [6]) prenant en compte la coexistence de phénomènes d'usure et de panne aléatoire et décrit par la fonction $R(t) = \exp(-\lambda t) * \exp(-[\max(0, t-T)/\eta]^\beta)$ est aussi représenté ci-après.

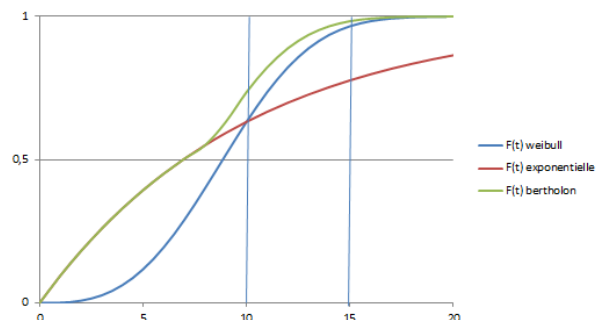


Figure 9 : Illustration par la loi de Bertholon

La loi de Bertholon se déduit des paramètres connus des lois exponentielles (λ) et de Weibull (η , β), ainsi que de la date T de début de vieillissement (ici T=8 ans).

L'idée est de se placer à la date T=10 ans, où un vieillissement est observé (courbe verte) avec un beta important : cette approche permet de prédire le nombre de pannes supplémentaires en cas d'extension de la mission jusqu'à T=15 ans par exemple. Dans notre cas, 30 pannes ont été observées à T=10 ans, et pour la période d'extension, il faut prévoir 10 pannes supplémentaires dues au vieillissement par rapport au nombre de pannes sur la même période sans vieillissement.

La méthode d'intégration de la fiabilité est la suivante : les courbes F(t) permettent de connaître à chaque date le ratio de pannes par rapport au parc total de 50 équipements et le delta d'une année sur l'autre permet de connaître le nombre de pannes à la date t, c'est-à-dire sur 1 an. Les résultats obtenus par cette intégration sont détaillés ci-dessous :

années (fin)	10	11	12	13	14	total
Cas 1: F(t) exponentielle	0,632	0,667	0,699	0,727	0,753	
Cas 2: F(t) bertholon	0,736	0,822	0,889	0,936	0,966	
Pannes cumulées Cas 1	32	33	35	36	38	
Pannes cumulées Cas 2	37	41	44	47	48	
Pannes annuelles Cas 1	2	1	2	1	2	
Pannes annuelles Cas 2	7	4	3	3	1	
Pannes supplémentaires dues au vieillissement	5	3	1	2	-1	10

La méthode permet donc à partir du MTBF observé avec la loi exponentielle et les paramètres observés de la loi de Weibull calculés selon les méthodes décrites au début de ce chapitre de prendre des mesures préventives pour couvrir la période d'extension. Dans le cas test, cela amène à prévoir un stock de 10 rechanges supplémentaires à la date T=MTBF.

La problématique du RUL (Remaining Useful Lifetime) est donc traitée ici via la prédiction du nombre de pannes pendant la phase d'extension. L'intervalle de confiance peut quant à lui être déterminé en encadrant la droite de Weibull par 2 droites parallèles à la droite de Weibull et décalées de $D=t(n-2, 1-\alpha/2) * \sigma / \sqrt{n}$ où t est la loi de Student à n - 2 degrés de liberté pour un risque α . Pour les modèles Type A et B étudiés plus haut (voir figure 8), le nombre d'échantillons

est supérieur à 50, d'où un IC de +/- 6mois sur le MTBF ce qui est tout à fait exploitable.

Un résultat similaire est aussi atteint grâce à l'approche bayésienne décrite ci-dessous (voir figure 11), qui permet de calculer également un intervalle de confiance (IC) satisfaisant pour le facteur de forme β . Cet IC peut également être obtenu par l'approche classique en utilisant la méthode itérative du maximum de vraisemblance pour calculer le contour de Weibull, appelée likelihood ratio bounds (LRB), cf [9].

Finalement, l'incidence de ces ICs sur le stock de rechange supplémentaire précédemment calculé est négligeable.

Approche bayésienne

Afin de corroborer les résultats obtenus par les méthodes graphiques et analytiques, on utilise les statistiques bayésiennes afin d'estimer les paramètres de Weibull (ou de la loi Exponentielle) et leur adéquation avec les données de vieillissements. Pour cela, on utilise le programme JAGS (Just Another Gibbs Sampler) sous l'environnement R (cf [7]). Ce programme est basé sur un couplage de l'algorithme d'échantillonnage de Gibbs (tirage aléatoire par échantillon d'une valeur à priori dans une distribution définie et comparaison avec la valeur a posteriori) avec l'algorithme de la marche de Metropolis (partant d'une valeur à priori, tirage aléatoire itératif d'un écart et comparaison du posteriori avec les données d'entrée pour définir un chemin de convergence).

Le programme JAGS va rechercher les paramètres de la courbe simulée (ici loi de Weibull de paramètres λ et β ou loi Exponentielle de paramètre λ) tels que les données d'entrées appartiennent à une distribution normale dont l'espérance est la valeur simulée et la précision un paramètre calculé. Chaque paramètre suit une distribution gamma dont les paramètres de forme et d'intensité sont choisis à priori tels que leur valeur médiane soit une valeur raisonnablement attendue avec une variance suffisamment grande pour ne pas trop influencer le résultat a posteriori. Les calculs ont été réalisés sur trois chaînes de 50 000 itérations suffisantes pour obtenir une bonne convergence illustrée par une faible variance relative de la distribution finale (ci-dessous, les itérations des trois chaînes et la distribution finale de la densité du paramètre λ de la loi de Weibull pour l'équipement A) :

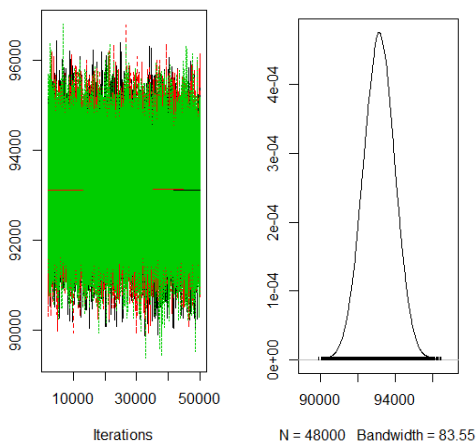


Figure 10: Convergence de la méthode bayésienne

Le programme JAGS fournit les distributions finales des paramètres de la courbe simulée, par exemple ci-dessous les paramètres de la loi de Weibull pour l'équipement A et la distribution de la précision de la loi normale globale (ici inférieure à 10^{-4}) ainsi qu'un diagramme de relation entre paramètres :

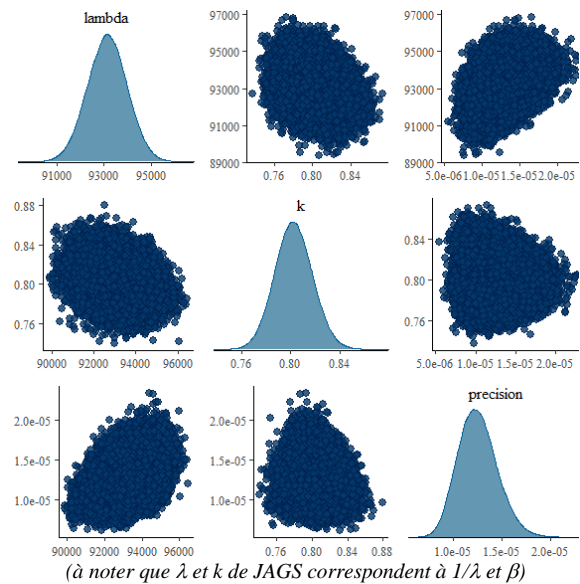


Figure 11: Distribution des paramètres et relations inter-paramètres

Le programme fournit aussi un indice d'adéquation, le DIC (Deviance Information Criterion) qui permet ici de différencier l'adéquation de la loi de Weibull estimée (qui donne des paramètres confirmant ceux calculés par les autres méthodes) avec les données d'entrée et celle de la loi Exponentielle estimée avec les mêmes données. En effet, comme $DIC_{WEIBULL} < DIC_{EXPONENTIELLE}$ et que leur écart est supérieur à 5, on peut conclure que la loi de Weibull trouvée est significativement plus adéquate que la loi Exponentielle.

IV. LES SIGNAUX DE MAINTENANCE

On distinguera par la suite trois types de signaux pouvant être analysés et utilisés pour la maintenance des systèmes à savoir les signaux forts et triviaux, les signaux faibles directs ou encore les signaux faibles indirects.

Tous les systèmes actuellement en opération disposent d'une part d'une chaîne de surveillance des performances du système, en direct ou en différé, et d'autre part d'un système d'archivage de ces dernières. La surveillance a pour but premier de déclencher une réaction de l'opérateur lorsque le système détecte une panne tandis que l'archivage permet de faire expertiser à posteriori la panne afin d'isoler l'événement ou la suite d'événements ayant conduit à la panne. A ce titre, il existe un compromis important dans la stratégie de surveillance et d'archivage, entre le nombre de signaux à surveiller et leur fréquence de rafraîchissement, tous deux nécessaires pour la détection et l'analyse de pannes versus la surcharge de l'infrastructure réseau et l'archivage de ces données.

1) Signaux forts et triviaux

Pour garantir cette surveillance, il est communément exigé lors du design que le système lui-même ainsi que tous ses sous-systèmes critiques, disposent de fonctionnalités d'autodiagnostic en cas de panne. Ces autodiagnosics, ou BIT (*Built In Test*), sont exécutés jusqu'à un certain niveau de hiérarchie dans le système, à l'allumage, à l'extinction, au crash ou ponctuellement à la demande de l'opérateur.

Ces autodiagnosics couvrent à priori les pannes les plus probables ou à défaut doivent permettre d'isoler le sous-ensemble défectueux. Ils sont établis pour partie à partir de l'expertise du fabricant, de l'expérience passée ou encore de normes applicables (par exemple cf. [8]). En revanche, ils sont figés lors du design et l'ajout de nouveaux points de tests est généralement exclu pour de multiples raisons (limites physiques, requalification,...)

Les signaux forts et triviaux correspondent à des événements de panne anticipés et facilement visibles à l'échelle du système. Ils donnent généralement lieu à une maintenance dite corrective, à posteriori et en réaction de la panne observée.

Pour la suite de cette analyse, prenons l'exemple d'une antenne active. L'antenne est un composant critique de la chaîne de réception. Elle est généralement placée à l'extérieur et à proximité des locaux abritant les équipements de réception et de traitement. Le caractère actif de l'antenne traduit l'utilisation d'amplificateurs et autres composants actifs dans sa conception, lesquels sont connus pour leur susceptibilité au vieillissement (exposition à des températures extrêmes, cyclages thermiques jour/nuit, fluctuations d'alimentation).

Les autodiagnosics du récepteur connecté à cette antenne prévoient notamment un test de cette dernière à l'allumage. En cas de panne de l'antenne, rupture de l'amplificateur principal par exemple, plusieurs signaux forts et triviaux peuvent être remontés. Tout d'abord de par l'impact de cette panne sur le système. Bien que globalement robuste à la perte d'un sous-système, les performances du système peuvent être affectées globalement de façon marginale ou localement de façon significative. Grâce aux BIT, en surveillant le courant consommé par l'antenne ou la puissance totale renvoyée par celle-ci, le récepteur peut aussi remonter de lui-même une alerte sur la défaillance de l'antenne. Ces deux signaux forts déclencheront une opération de maintenance auprès de l'opérateur : remplacement de l'antenne.

2) Signaux faibles directs

La seconde classe de signaux regroupe les signaux dits faibles aux effets directs. Ils se caractérisent par des effets observables mais noyés dans le volume d'information. Ces signaux sont le plus souvent disponibles, avec des conséquences visibles mais non perçues, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord car ces signaux correspondent le plus souvent à des performances très légèrement dégradées d'un composant, à des pannes non franches ou intermittentes et qui ne sont pas détectées par les BIT sous-systèmes (non couverts par les BIT, intermittents, dégradation trop faible). D'autre part car les dégradations sur le système restent inférieures aux marges prévues.

Reprenons l'exemple précédent des antennes actives. Dans le cas d'une baisse du gain d'amplification, l'antenne

reste opérationnelle. Elle est toujours considérée fonctionnelle par le récepteur et les performances du système ne sont pas directement impactées. Pourtant cette baisse du gain est visible sur les données instantanées mais n'entraîne aucune dégradation des performances du système. En revanche, une accumulation des données sur des temps plus ou moins longs, une comparaison par rapport à l'ensemble des équipements similaires sur le parc ou la mise en place d'indicateurs dérivés après consolidation des données permet de détecter facilement ces signaux faibles directs.

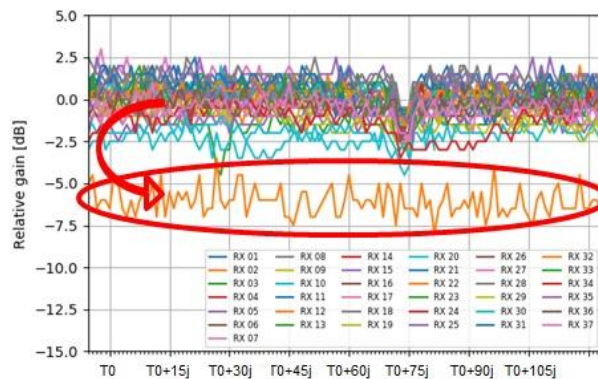


Figure 12 illustre le cas typique d'une baisse d'amplification de l'antenne. Ce signal faible direct est facilement observable par comparaison à l'ensemble des autres antennes du parc.

Autre exemple : cette fois-ci intéressons-nous à une métrique représentant un biais de mesure propre aux récepteurs et dont l'antenne est l'un des principaux contributeurs. Cette métrique est calculée par le système après consolidation des données provenant de multiples récepteurs. Cette métrique n'est pas directement accessible au récepteur lui-même. Ce biais de mesure est physiquement stable dans le temps. En cas de variations instantanées importantes, il crée des incohérences de mesure conduisant à une interruption locale du service fourni par système. C'est ce signal fort (perte locale de service) qui a été observé lors de la première occurrence d'une telle panne. Après une analyse détaillée à posteriori de la première occurrence, un signal faible a pu être isolé et corrélé à cette panne,

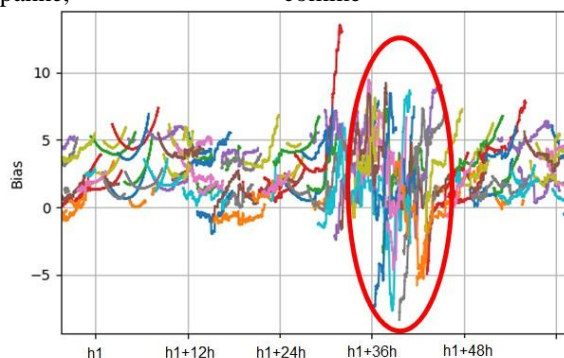


Figure 13.

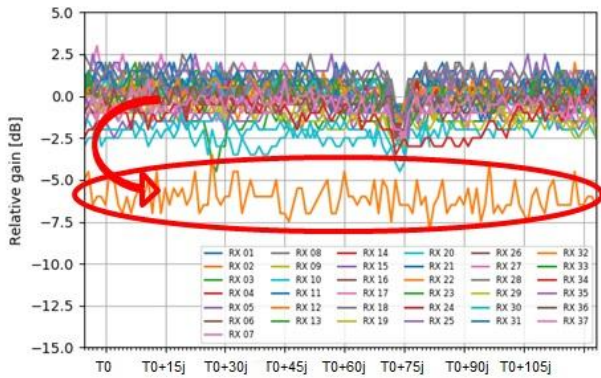


Figure 12 : Exemple de signaux faibles directs (diminution du gain d'amplification d'une antenne)

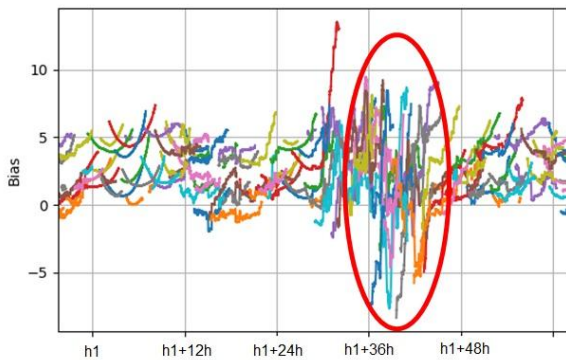


Figure 13 : Exemple de signaux faibles directs (Variation du biais de mesure)

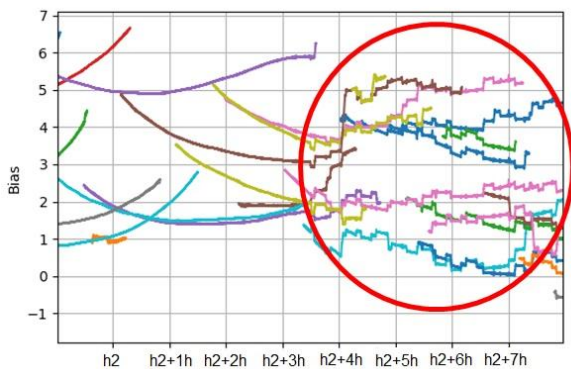


Figure 14 : Exemple de signaux faible directs (Signature à priori d'une variation du biais de mesure)

En plus de la signature lors de la panne, l'analyse a permis d'isoler une signature à priori de la panne, illustrée

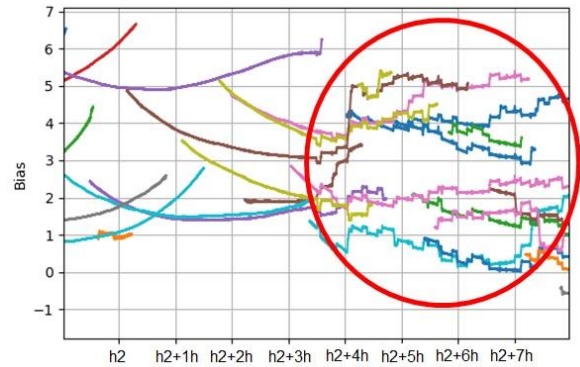


Figure 14, où des oscillations de faible magnitude sont visibles sans dégrader les performances du système. Cette signature à priori a pu être identifiée a posteriori sur un second récepteur, plusieurs semaines avant la panne.

Les signaux faibles directs sont généralement les prémices d'une défaillance en devenir. Déjà accessibles, ils sont une excellente source d'informations pour prédire les pannes et les maintenances à y associer.

3) Signaux faibles indirects

Enfin, la troisième classe de signaux regroupe les signaux faibles aux effets indirects. Comme les précédents, ils se caractérisent par des effets le plus souvent observables seuls ou en groupe, mais dont l'origine est à priori inconnue. C'est généralement l'expertise mise en œuvre à la suite d'une panne franche de type signaux forts qui permet d'isoler l'ensemble des signaux faibles indirects ayant conduit à celle-ci.

Par exemple, le redémarrage intempestif de certains sous-systèmes peut ne pas engendrer de dégradations de performances du système. De même les causes d'un redémarrage peuvent être multiples comme par exemple un défaut transitoire d'alimentation, une corruption mémoire ou encore l'expiration d'une sentinelle (*watchdog*). Tous ces facteurs sont liés au vieillissement mais sont difficilement séparables sans analyse approfondie sur le matériel lui-même. Cependant, couplé à un autre signal faible indirect, par exemple l'allongement du temps de traitement d'une tâche élémentaire simple, peut permettre de diagnostiquer l'expiration de la sentinelle à cause d'un ralentissement du processeur conduisant à un redémarrage de l'équipement.

Reprenons l'exemple des antennes actives pour finaliser l'illustration du propos. Sous certains scénarios opérationnels, il arrive qu'un satellite arrête momentanément d'émettre son signal. A la reprise, tous les récepteurs devront faire une réacquisition de ce signal. Afin de garantir des performances nominales du système, au moins un récepteur doit réacquérir le signal avant l'expiration d'un *timeout*, de l'ordre de quelques minutes. Une dégradation, même légère, du gain de toute chaîne de réception, dont l'antenne fait partie, peut avoir des conséquences importantes sur les temps de réacquisition.

La Figure 15, illustre le temps de réacquisition des différents récepteurs au cours d'une cinquantaine

d'événements de coupure du signal satellitaire. On retrouve sur cette figure un groupe de récepteurs particulièrement performants, cercle vert pour lesquels les temps de réacquisition sont systématiquement faibles, venant masquer les sous-performances d'un autre groupe de récepteurs, cercle rouge pour lesquels un nombre important de réacquisition ne sont pas achevées après deux heures. Ainsi, ce signal faible indirect permet de surveiller plus spécifiquement certains récepteurs dans le parc et les proposer pour une future analyse détaillée par le constructeur.

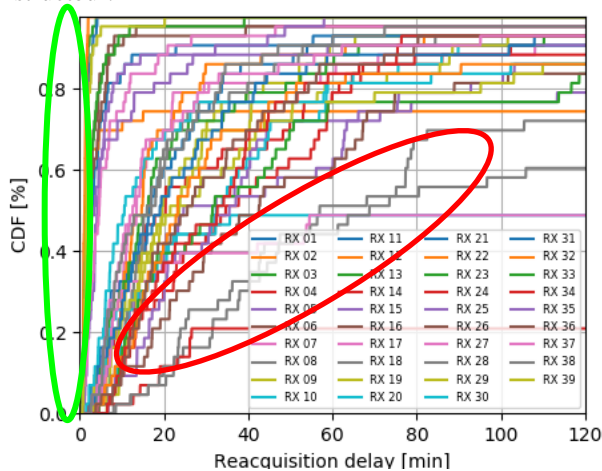


Figure 15 : Exemple de signaux faibles indirects (Réacquisition après coupure du signal satellitaire)

Comme les signaux faibles directs, les signaux faibles indirects sont généralement les prémices d'une défaillance en devenir bien que la cause racine soit souvent inconnue sans une analyse détaillée. Combinés, ils se révèlent être une source importante d'information pour prédire et anticiper les possibles défaillances.

V. MAINTENANCE PREDICTIVE

On retrouve aujourd'hui communément deux types de maintenance des systèmes : La maintenance corrective, activée à posteriori d'une panne franche sur un signal fort et dont le but est de réparer ou échanger un équipement défectueux ; la maintenance préventive dont le but est d'anticiper à priori certaines pannes prévisibles.

La maintenance préventive est établie par le constructeur du sous-système. Contrairement aux autodiagnostic, elle peut être ajustée au cours de la vie du système pour répondre à de nouvelles pannes récurrentes. Sa singularité est de traiter de façon systématique et cyclique les équipements concernés. On peut citer par exemple le remplacement tous les dix ans de piles boutons permettant de maintenir des mémoires non volatiles, le nettoyage tous les deux ans des ventilateurs ou encore le remplacement des blocs d'alimentation toutes les 10000h de fonctionnement.

La maintenance prédictive est une nouvelle forme de maintenance tirant partie des révolutions technologiques en matière de big data et d'intelligence artificielle. La maintenance prédictive, est une forme de maintenance préventive dans le sens où la panne est anticipée mais diffère de cette dernière dans son processus de déclenchement. Ni systématique, ni cyclique, la maintenance prédictive est régie par des données objectives. Au plus proche de l'usure réelle des composants, la

maintenance prédictive implique cependant d'aller jusqu'à la panne pour identifier le point limite de fonctionnement. Cette approche peut s'avérer bloquante dans le cas de systèmes critiques impliquant une sûreté de fonctionnement ou la sécurité des individus.

Pour tirer pleinement profit de la quantité de donnée disponible, la maintenance prédictive gagnerait à utiliser des sources hétérogènes provenant des données mission (performances système, données brutes des sous-systèmes) mais aussi des systèmes support (logistique, stockage, opérations, maintenance, historique de panne).

Dans le cadre des systèmes développés et opérés par Thales Alenia Space, de nombreuses évolutions de maintenance voient le jour pour y intégrer une composante prédictive. Les signaux faibles, directs et indirects, tels que décrits précédemment, permettent d'ores et déjà de façon ad-hoc et pragmatique de réaliser avec fiabilité de telles prédictions.

L'avenir passera par l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) pour réaliser ce travail dans des proportions adaptées aux grands systèmes de systèmes. On peut par exemple citer l'utilisation de méthodes d'apprentissage supervisées pour détecter et isoler les signaux faibles directs une fois la signature connue et expertisée ou encore les méthodes d'apprentissage non supervisées pour les signaux faibles indirects permettant de recenser les matériels jugés les plus susceptibles sur lesquels mener des investigations plus poussées ou y associer des limitations de déploiement et d'opération.

VI. CONCLUSIONS

L'étude a permis de montrer l'intérêt et la faisabilité de l'approche analytique pour détecter le vieillissement au niveau d'un parc d'équipements et ainsi de sécuriser une phase d'extension de durée de vie d'un système (voir Cas test du §III).

L'intérêt des différents signaux de maintenance (forts, faibles, indirects) dans la surveillance de l'évolution de l'état du système et en particulier des dégradations liées au vieillissement a également été démontrée.

A partir de ce type de constat, il est possible d'envisager le développement puis l'utilisation d'une fonction de maintenance prédictive dans un système satellitaire, basée sur des algorithmes classiques ou de l'IA. Ce type de fonction n'est aujourd'hui pas couramment utilisée, et mériterait d'être prévue dans tout nouveau système, à la lumière des bénéfices qu'elle peut apporter, entre autres en terme de support à la résolution d'incidents ou de gestion de l'état du système.

Il y a fort à parier que les techniques d'intelligence artificielle arriveront à terme à détecter des signaux indirects d'une extrême faiblesse pour prédire de potentielles pannes. Seule l'expérience permettra ainsi de changer de paradigme en levant la barrière psychologique résiduelle de la maintenance à priori d'un système, ou d'un sous-système, alors même qu'il reste conforme à ses marges de tolérance.

Références

- [1] Matrisk & consortium, New Reliability Prediction Methodology Aimed at Space Applications, 25/11/2019

- [2] MIL-HDBK-217F (+ notice 1 et 2) Reliability prediction of electronic equipment
- [3] Ademe, Étude sur la durée de vie des équipements électriques et électroniques, Juillet 2012
- [4] F. Palisson, Détermination des paramètres du modèle de Weibull à partir de la méthode de l'actuariat - Revue de statistique appliquée, 1989
- [5] A. Lannoy, Méthodes fréquentistes de traitement des données de défaillance, Direction des études et recherches EDF, Juillet 1993
- [6] H. Bertholon, Une modélisation du vieillissement, thèse de doctorat en Mathématiques appliquées, Université Joseph Fourier (Grenoble), 2001
- [7] JAGS, program for analysis of Bayesian hierarchical models using Markov Chain Monte Carlo (MCMC) simulation, 18/07/2017
<https://sourceforge.net/projects/mcmc-jags>
- [8] ESA-ESTEC, ECSS-Q-ST-40C Space product assurance Safety, 6/03/2009
- [9] M. Pecht, Product Reliability, Maintainability, and Supportability Handbook, 2009