

HEALTH MONITORING DANS LE DOMAINE SPATIAL

HEALTH MONITORING IN THE SPACE FIELD

Roland Laulheret, Sébastien Bosse, André Cabarbaye*,

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
18, avenue Edouard Belin - 31401 Toulouse

* CAB INNOVATION
3, rue de la Coquille - 31500 Toulouse
www.cabinnovation.com

Résumé

Cette communication présente une démarche de mise en œuvre du Health Monitoring sur les satellites spatiaux. Elle est le fruit d'actions de recherche et développement menées par le CNES avec certains de ses partenaires industriels (ADS et Thales). Elle porte notamment sur l'identification et la modélisation des phénomènes de dégradation afin d'en améliorer le diagnostic et le pronostic. Elle propose une modèle de fiabilité en ligne des satellites basés sur l'état de dégradation courant observé par télémesure et l'exploitation des données de retour d'expérience (REX) acquises depuis le lancement.

Summary

This paper presents an implementation approach of Health Monitoring on space satellites. It is the result of actions of research and development conducted by CNES with some of its industrial partners (ADS and Thales). It focuses on the identification and modeling of degradation phenomena to improve the diagnosis and prognosis. It offers an online reliability model of satellites based on the current state of degradation observed by telemetry and operating feedback data (REX) acquired since launch.

Mots clés

Health Monitoring, Diagnostic, Pronostic, Aide à la décision, Satellite, Systèmes spatiaux

Introduction

Afin de limiter la pollution en orbite, la Loi relative aux Opérations Spatiales (LOS) impose de désorbiter les satellites à la fin de leur mission. Le processus d'opération des satellites intègre ainsi la mise à mort d'un objet ayant encore un certain potentiel qu'il importe d'exécuter au bon moment.

Ici comme dans bien d'autres domaines, l'enjeu du Health monitoring ne se limite pas à la maintenance prédictive mais recouvre toutes les actions pouvant résulter de la connaissance de l'état d'un système et de son potentiel restant (ajustement des conditions d'exploitation, maintenance, décision relative à la mise hors service ou à la pérennisation de ce dernier, etc.).

Les satellites n'étant pas réparables en orbite, à l'exception de certains logiciels téléchargeables, l'aide à la décision dans le domaine spatial concerne :

- les opérations qui portent sur l'exploitation, la surveillance et les éventuelles actions de reconfiguration à bord par activation de ressources redondantes embarquées,
- le retrait de service dans le cadre de la LOS qui impose de désorbiter les satellites à la fin de leur mission (libération d'une position sur l'orbite géostationnaire ou rentrée dans l'atmosphère en moins de 25 ans),
- le lancement de satellites de remplacement stockés au sol ou l'activation de redondances en orbite,
- le démarrage de nouveaux programmes de développement devant pérenniser des services relatifs aux Télécommunications ou à l'observation de la Terre, par exemple.

Mené jusqu'alors de manière plus ou moins empirique, ce processus décisionnel intègre dorénavant la mise hors service des satellites dans le respect des exigences réglementaires.

Cherchant à améliorer le diagnostic (état du satellite en orbite) et le pronostic (durée de vie résiduelle), le « Health Monitoring » présente alors un intérêt évident. Il contribue à augmenter les chances de réussir la phase de désorbitation après une durée d'exploitation la plus longue possible afin de répondre, au mieux, aux enjeux économiques et/ou scientifiques de la mission. Cette durée opérationnelle peut être plus courte mais aussi sensiblement plus longue que la durée de vie initialement prévue, pour laquelle le satellite a été qualifié, selon les marges de dimensionnement, les niveaux de sollicitations en exploitation et les aléas rencontrés.

Le suivi à distance de l'état de santé d'un satellite se révèle cependant particulièrement complexes. C'est pourquoi le CNES mène depuis quelques années une activité de recherche et développement sur le Health Monitoring, avec les industriels ADS (Airbus Defense and Space) et THALES, avant d'en envisager une utilisation opérationnelle sur ses systèmes spatiaux [1] [2]. Le but étant de disposer à termes d'une réelle capacité d'estimation de la fiabilité en ligne des satellites en orbite.

Cet article présente la démarche envisagée de mise en œuvre du Health Monitoring sur les satellites.

Spécificités du domaine spatial

Le domaine spatial se singularise par rapport à d'autre domaine d'ingénierie. Il concerne un environnement particulier (radiations, micrométéorites, oxygène mono atomique...) conduisant à des modes de défaillance spécifiques (panne transitoire ou permanente et dégradation). Les satellites ne sont pas réparables (hormis des logiciels téléchargeables) mais sont reconfigurables par activation de redondances. La gestion des anomalies ou FDIR (Fault Detection, Isolation and Recovery) garantie d'abord l'intégrité du satellite, notamment au moyen d'un mode survie, puis la disponibilité opérationnelle.

L'observabilité est limitée aux besoins des opérations et de la gestion des pannes car les télémesures sont contraintes par la capacité de la liaison bord sol. Les satellites sont principalement constitués de composants électroniques. Aussi, les modèles de fiabilité prévisionnelle font, pour la plupart, l'hypothèse de taux de défaillance constants. La tenue de la durée de mission vis-à-vis des phénomènes d'usure ou de dégradation fait cependant l'objet d'une démonstration par analyse ou essais de qualification. Les séries en fabrication sont limitées à quelques exemplaires conduisant à un retour d'expérience (REX) peu fourni. La durée de vie des satellites est relativement longue (5 à 25 ans) ainsi que leurs cycles de développement (3 à 10 ans).

Méthodologie de mise en oeuvre

L'action de R&T sur le Health monitoring des satellites a suivi la démarche suivante :

- Identifier et caractériser l'ensemble des phénomènes de dégradation des satellites.
- Améliorer si nécessaire l'observabilité des dégradations, celle des défaillances étant jusqu'alors bien couvertes par la FDIR, du moins au niveau des blocs commutables.
- Etablir un état de l'art des modèles de dégradation. Celui-ci a fait l'objet d'une étude universitaire dans le cadre de la R&T [3].
- Associer à chaque phénomène de dégradation un modèle théorique propre afin de pouvoir estimer le potentiel restant du satellite vis-à-vis de chacun d'eux, en faisant l'hypothèse d'indépendance entre les phénomènes de dégradation.
- Estimer la fiabilité en ligne des équipements non soumis à usure (électronique) en consolidant les taux de défaillance par le REX cumulé depuis le lancement.
- Constituer un macro modèle de fiabilité en ligne du satellite complet en tenant compte des pannes et dégradations en orbite et du Retour d'Expérience (REX) cumulé depuis le lancement. La fiabilité en ligne d'un satellite peut alors s'exprimer au moyen de la formule {1}. L'indépendance entre les phénomènes de dégradation ayant été vérifiée à l'exception de l'influence d'une légère élévation de température du satellite durant la mission due notamment à la perte d'efficacité des radiateurs.
- Tenter d'évaluer a priori l'apport du Health monitoring en exploitation afin de dimensionner au mieux les ressources qui lui sont consacrées.

$$R_T(t) = R_{T \text{ sans usure}}(t) * \prod R_{T \text{ Phénomène de dégradation } i}(t) \quad \{1\}$$

Phénomènes de dégradation

Une liste des phénomènes de dégradation des satellites a été établie en recherchant les possibilités de modéliser ces derniers et d'améliorer leur observabilité. Ceux-ci portent notamment sur les réserves d'ergol, les propulseurs, les batteries d'accumulateurs, les panneaux photovoltaïques, les mécanismes, les radiateurs et les composants électroniques soumis aux radiations.

La propulsion chimique résulte de l'envoi d'ergol (hydrazine) dans une chambre de combustion dans laquelle une réaction chimique produit des gaz éjectés à travers une tuyère. Les contraintes thermiques dégradent le lit catalytique et entraîne une baisse de performance du moteur. La quantité d'ergol dans les réservoirs fait l'objet d'une prédiction à partir de mesures de pression effectuées par des capteurs embarqués et par intégration des coups de tuyère. La différence entre les écarts de vitesse prédits et constatés du satellite peut mettre en évidence une dégradation de la propulsion.

La propulsion ionique consiste à ioniser un fluide propulsif (xénon), puis à l'accélérer au moyen d'un champ électrostatique. Une cathode externe permet de neutraliser le potentiel du jet. L'érosion des parois en céramiques de la chambre confinant le plasma, l'usure de la cathode d'ionisation et de la grille d'accélération sont les principaux phénomènes de dégradation de la propulsion ionique.

Les batteries d'accumulateurs actuellement utilisées sur les satellites sont de technologie lithium-ion. Elles sont constituées d'accumulateurs en série (string), eux même montés en parallèle. L'ajout de strings additionnels par rapport au besoin permet de compenser la perte de certains d'entre eux. Les batteries se dégradent en termes de capacité et de résistance interne. Après une dégradation initiale en stockage, d'autant plus importante que la batterie est chargée et que sa température est élevée, la capacité de la batterie décroît en fonction du nombre de cycles de charge et décharge. Cette dégradation dépend de la profondeur de décharge (DOD) et de la température de la batterie.

Le générateur solaire (GS) permet de produire de l'énergie électrique en orbite. Fixe ou mobile par rapport au satellite (afin de s'orienter vers le soleil) celui-ci est constitué de cellules photovoltaïques montées en série pour former des strings, eux même montés en parallèle pour constituer des sections. Le GS est dimensionné en phase de conception en fonction du besoin de puissance en fin de vie. Outre l'incertitude de dimensionnement en début de vie (3%), les détériorations par UV et micrométéorite (de l'ordre de 0,25%/an) et les dégradations dues aux radiations (1%/an) sont aléatoires et dépendent de l'orbite du satellite.

Différents mécanismes sont utilisés sur les satellites pour assurer des mouvements de translation ou de rotation au moyen de diverses technologies (engrenages, roulements à billes, paliers lisses, paliers magnétiques, collecteurs tournant, lames flexibles, etc.). Les mécanismes sont dimensionnés pour fonctionner durant leur mission et supporter les vibrations et efforts au lancement. Les principaux phénomènes de dégradation rencontrés sont dus aux frottements et à la dégradation de la lubrification au cours du temps. Ils peuvent parfois s'observer par une augmentation des couples d'actuation (courant moteur).

Le contrôle thermique maintient les équipements du satellite dans une gamme de températures de fonctionnement de manière passive, par échange de chaleur, rayonnement ou absorption, et active, au moyen de réchauffeurs. Des machines cryogéniques sont parfois utilisées pour atteindre des basses températures (détecteur infrarouge, etc.). Les principaux phénomènes de dégradation concernent le revêtement des radiateurs externes dont l'émissivité diminue par l'effet des radiations UV, de l'oxygène monoatomique et des micros météorites. La dégradation des radiateurs extérieurs peut se traduire par une diminution de la puissance de réchauffage et/ou une augmentation de la température moyenne du satellite. Une telle augmentation de la température peut alors avoir un impact sur la fiabilité des équipements électroniques.

A l'exception de l'optoélectronique, l'électronique est généralement considérée sans usure à taux de défaillance constant. La dose de radiation reçue altère cependant les caractéristiques des composants jusqu'à les rendre inopérants. Aussi, la tenue en dose de radiation cumulée des équipements électroniques est-elle vérifiée par essais et analyses en regard des conditions

prévues sur l'orbite. De plus, les radiations peuvent avoir des effets singuliers qui font l'objet de protections spécifiques (code correcteur, anti-latchup, etc.).

Diagnostic

Couvert jusqu'alors par la surveillance de l'état ou du dépassement de seuil de données de télémétrie, le diagnostic peut être amélioré par des techniques de type ingénierie, fondées sur la connaissance intime du système et l'expertise métier, ou de type « data mining » identifiant des changements ou des évolutions lentes (dégradations) dans des séries d'observation chronologiques. Par ailleurs, des techniques de type « clustering » peuvent être mises en œuvre pour comparer des signatures caractéristiques de l'état de dégradation d'équipements d'âges différents.

A titre d'exemple, des travaux d'ADS [4] ont montré la possibilité d'observer et prédire la dégradation d'une batterie d'accumulateurs à partir de motifs répétitifs dans des télémétries, comme l'illustre la figure 1.

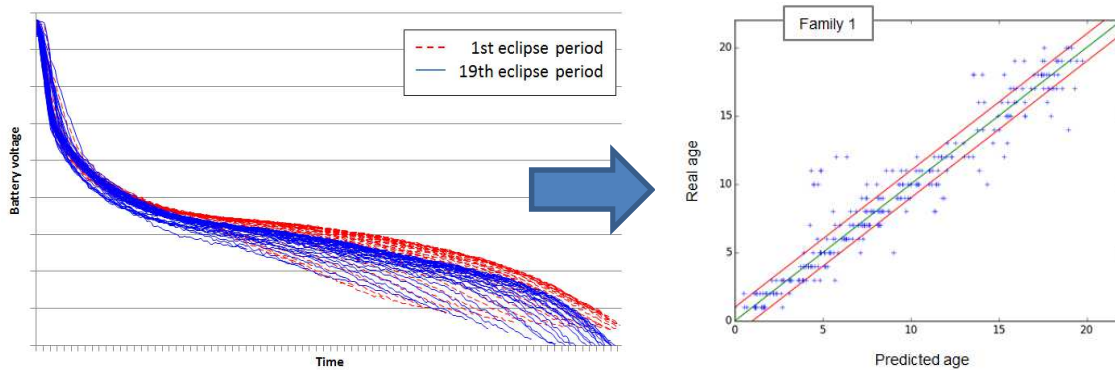


Figure 1. Prédiction de dégradation à partir de motifs répétitifs

Ces motifs correspondent à l'évolution de la tension de décharge de la batterie d'accumulateurs d'un satellite géostationnaire durant les saisons d'éclipses. On observe un abaissement général des courbes correspondantes tout au long de la vie du satellite, des courbes rouges durant la première année aux courbes bleues à la neuvième année (les courbes intermédiaires n'étant pas représentées). La mesure ponctuelle de la tension de décharge est inexploitable et seuls les motifs saisonniers pris dans leur ensemble sont susceptibles de donner une information de vieillissement après divers traitements.

Les mesures ont d'abord fait l'objet d'une synchronisation après interpolation de chacune des courbes. L'acquisition de données a ainsi porté sur 10 points de chacun des 17 cycles de chacune des saisons (2 par ans) espacés d'un même intervalle de temps. Ces données ont alors fait l'objet d'une réduction par une analyse en composantes principales (ACP) puis d'une modélisation par la technique du krigeage, garantissant un minimum de variance, à partir des 3 coefficients principaux de l'ACP. Il en résulte un graphe donnant une prédiction d'âge à partir d'un motif acquis au cours d'une saison.

Pronostic

La modélisation d'un processus de dégradation peut s'effectuer de diverses manières [3]. En l'absence de toute observation du phénomène, des modèles de fiabilité, telle que la loi de Weibull, peuvent être obtenus à partir de données statistiques de défaillance sur des produits similaires. Permettant d'estimer la probabilité de panne après une durée de fonctionnement donnée, ces modèles peuvent être complétés par des modèles d'accélération afin de tenir compte des conditions environnementales de l'élément concerné. La problématique de l'estimation de fiabilité s'avère différente dès lors qu'un produit est sujet à un processus de dégradation observable que l'on peut quantifier dans le temps et sur lequel un seuil limite d'acceptabilité peut être fixé. Il est alors possible de suivre l'évolution dudit processus en essais, afin d'évaluer la fiabilité prévisionnelle du produit, ou durant la vie opérationnelle, pour connaître son état de santé au jour le jour et estimer son potentiel restant. Les conditions d'utilisation et d'environnement peuvent également accélérer le processus de dégradation.

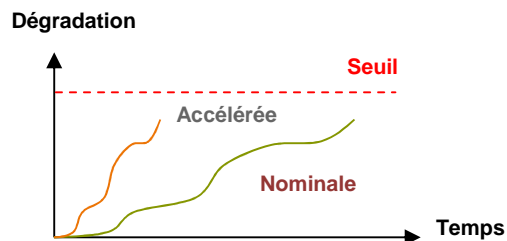


Figure 1. Processus de dégradation

En observant les écarts de dégradation par unité de temps, le phénomène peut se modéliser par un processus Gamma, si la dégradation est toujours croissante (détérioration monotone), ou par un processus de Wiener si la dégradation peut se réduire momentanément par des phénomènes d'amélioration voire de guérison. Le phénomène de dégradation peut être stationnaire ou non-stationnaire et être influencé par les conditions environnementales.

En l'absence d'observation directe, certains phénomènes de dégradation peuvent se modéliser par un processus de Markov caché. Proposé par Leonard E. Baum (1965) celui-ci décrit un processus de Markov dont les états, représentatifs de niveaux de dégradation progressive, sont partiellement observables à travers des indicateurs probabilistes (un spectre vibratoire ou une couleur d'huile donnera par exemple une information sur l'état de dégradation d'un mécanisme). L'algorithme de Viterbi est alors utilisé pour rechercher la suite de transitions la plus probable à partir d'une séquence d'observations et l'algorithme Forward-Backward, aussi nommé de Baum-Welch, pour estimer les paramètres du modèle.

D'autres phénomènes peuvent se modéliser par des processus markoviens déterministes par morceaux (PDMP). Développé par Davis (Davis 1984), ce type de processus de fiabilité dynamique hybride permet d'associer des caractéristiques aléatoires à des composantes continues en interaction (des variables environnementales qui vont influencer et être influencées par le système par exemple).

A titre d'exemple, un modèle paramétrique de dégradation de batterie d'accumulateurs a été développé à partir de données d'essais obtenues dans différentes conditions d'utilisation et d'environnement [5]. Celui-ci donne la capacité d'un accumulateur lithium-ion en fonction des cycles de charge et décharge selon la température et la profondeur de décharge (DOD) qui sont les deux paramètres les plus d'influents sur le vieillissement. La dégradation étant monotone, le modèle choisi est un processus gamma caractérisé par une loi d'accroissement $Z(t+h) - Z(t)$ égale à une loi gamma de paramètres αh et β . Ce modèle peut devenir non stationnaire au moyen d'une fonction croissante telle que $m(t) = p t^q$ et p et $q > 0$, en remplaçant αh par $m(t+h) - m(t)$. Il peut être accéléré par un facteur d'Arrhenius pour la température et un facteur de type puissance inverse pour la profondeur de décharge : $(1-DOD)^q$. La loi $Z(t+h) - Z(t)$ devient alors une loi gamma de paramètres $m(Fa^*(t+h)) - m(Fa^*(t))$ et β et peut être ajusté par la méthode du maximum de vraisemblance comme le montre la figure 2 au moyen d'un outil d'optimisation globale (Gencab dans cet exemple).

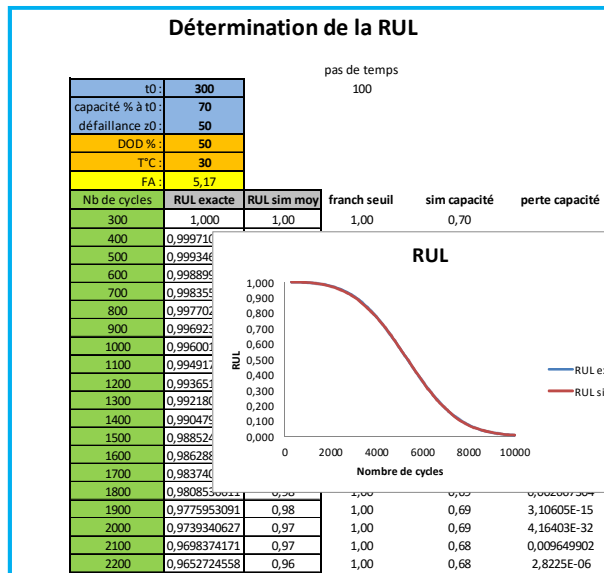
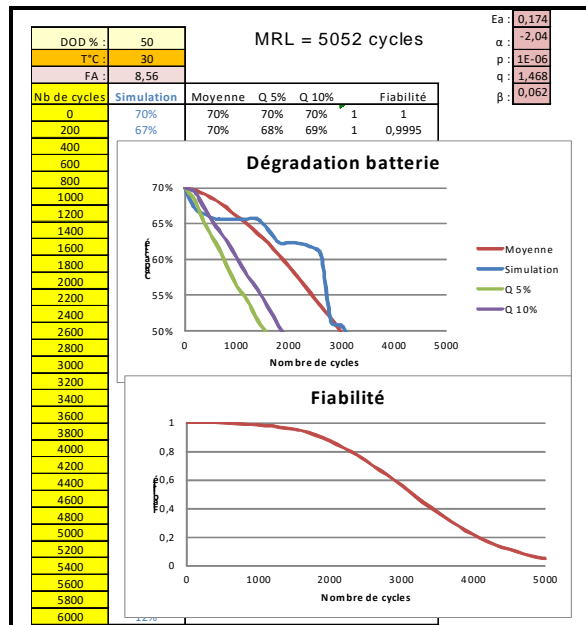
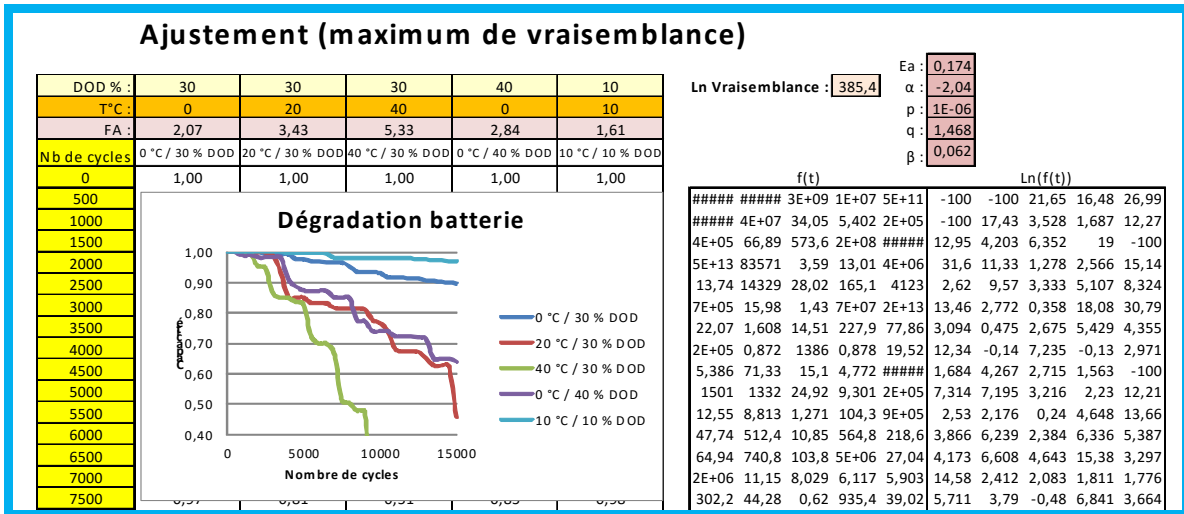


Figure 2. Modèle dégradation d'accumulateurs

Après ajustement et définition d'un seuil limite de fonctionnement, le modèle permet d'estimer la durée de vie restante RUL (Remaining Useful Life), à partir du niveau de dégradation courant, par simulation de Monte-Carlo ou par formule analytique. Celle-ci existe, en effet, dans le cas d'un processus Gamma. L'espérance mathématique de la RUL ou MRL (Mean Residual Life) peut être également calculée.

Prise en compte du REX

En dehors des phénomènes de dégradation, la fiabilité en ligne des équipements non soumis à usure (électronique) peut être estimée en considérant l'état courant du satellite après d'éventuelles défaillances, par actualisation du Bloc Diagramme de Fiabilité (BDF), et en consolidant les taux de défaillance par les données cumulées de retour d'expérience depuis le lancement. Cette consolidation peut s'effectuer simplement par application des techniques bayésiennes comme l'illustre la figure 3.

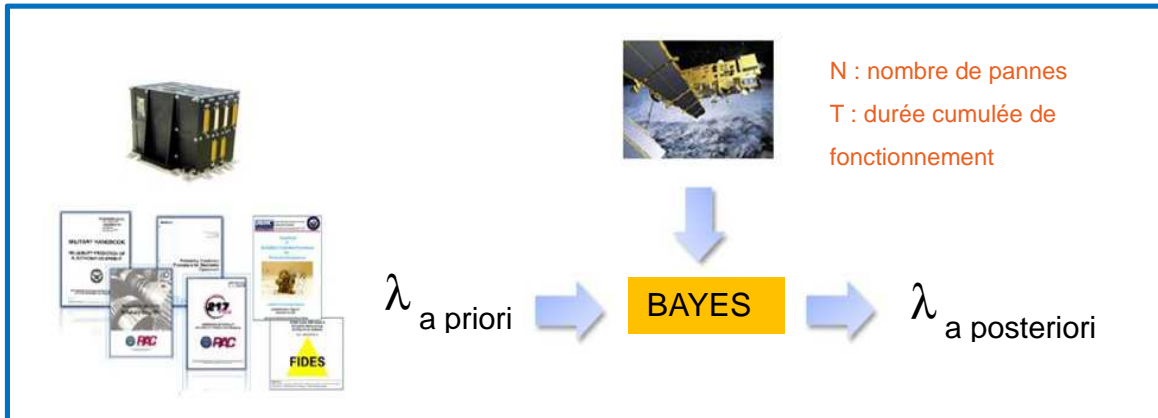


Figure 3. Consolidation des taux de défaillances

L'estimation prévisionnelle issue de divers recueils (Mil HDBK 217...) constitue la connaissance a priori. Si on considère que cette estimation est donnée à 60 % de confiance (jugée acceptable par l'expert), le taux de défaillance prévisionnel peut être choisi comme l'espérance et le quantile à 60 % d'une loi Gamma {2}.

$$g(\lambda / \alpha, \beta) = \frac{\lambda^{\alpha-1} (\beta)^\alpha e^{-(\beta)\lambda}}{\Gamma(\alpha)} \quad \{2\}$$

Soit $\alpha = 1,765156924$ et $\beta = \alpha / \lambda_{a\text{ priori}}$ après résolution de l'équation.

En considérant le nombre de pannes (N) et la durée cumulée de fonctionnement (T) d'un type d'équipement depuis le lancement, la loi a posteriori du taux de défaillance est alors donnée par la loi Gamma de la formule {3}.

$$g(\lambda / \alpha, \beta, n, T) = \frac{\lambda^{\alpha+n-1} (\beta + T)^{\alpha+n} e^{-(\beta+T)\lambda}}{\Gamma(\alpha + n)} \quad \{3\}$$

Le taux de défaillance a posteriori à 60% de confiance peut alors se calculer simplement par la formule analytique {4}, sous Excel, sans nécessité un REX conséquent comme le montre la figure 4.

$$\lambda = \text{LOI.GAMMA.INVERSE.N}(60\%; 1,765156924+n; 1/(1,765156924/\lambda_{a\text{ priori}} + T)) \quad \{4\}$$

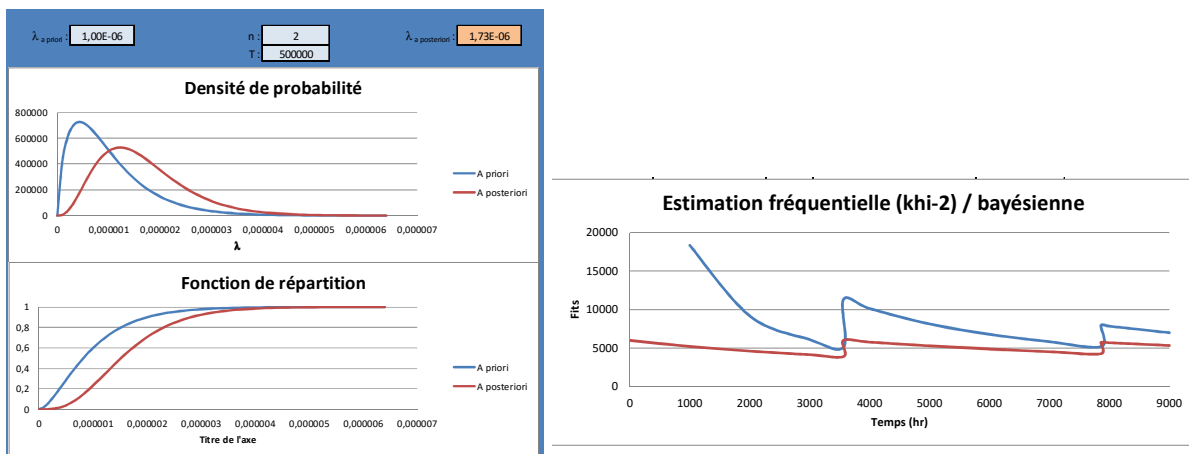


Figure 4. Estimation bayésiennes

La fiabilité en ligne d'un satellite complet (hors éléments soumis à usure) peut alors s'estimer en prenant en compte les pannes, par actualisation du BDF, et en mettant à jour les taux de défaillance des blocs commutables par exploitation du REX. Ainsi l'exemple de la figure 5 concerne un satellite 8 ans après son lancement qui a perdu son émetteur TX à 5,5 ans, sachant qu'un satellite identique lancé 1 an plus tard vient de perdre une section de son générateur solaire.

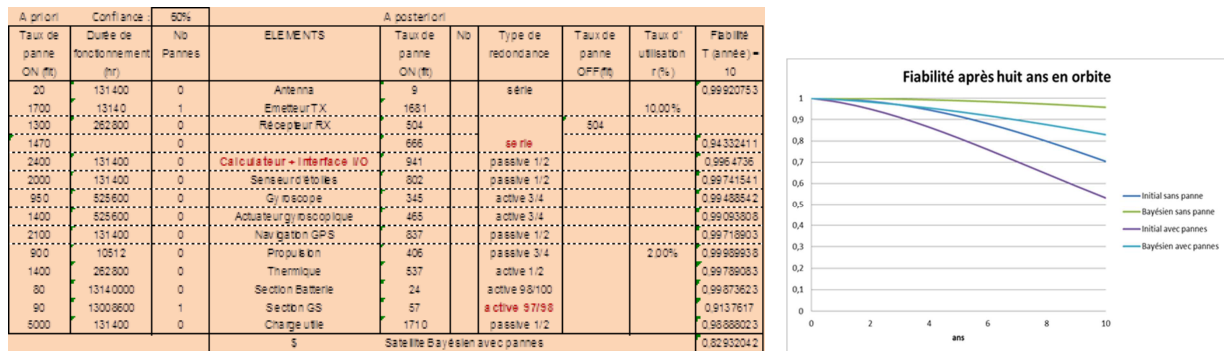


Figure 5. Fiabilité en ligne d'un satellite hors usure

Apport du Health Monitoring sur un système satellitaire

L'apport du Health Monitoring doit être estimé a priori afin de pouvoir dimensionner les ressources qui lui sont consacrées. Cet apport a été évalué sur un projet (classifié) relatif à une mission de 4 satellites au moyen d'un simulateur comportemental.

Les résultats de simulation ont permis d'envisager des gains substantiels en termes de :

- Qualité de service (diminution des risques d'interruption de longue durée)
- Coût annuel du service
- Anticipation des stratégies de renouvellement

Un service satellitaire à vocation pérenne présente en effet des risques d'interruption de longue durée en cas de pannes précoces du système en place ou d'aléas de développement des programmes de renouvellement ou de remplacement. Il présente également des risques d'utilisation de ressources surabondantes en orbite avec des coûts d'opération additionnels. Cependant l'apport du Health Monitoring est propre à chacune des missions

Conclusion

Un satellite est un objet complexe dont l'observabilité en orbite est limitée. Son diagnostic et son pronostic peuvent être améliorés pour aider à la prise de décisions à forts enjeux économiques dans le respect d'exigences réglementaires nouvelles. L'apport du Health Monitoring peut être évalué a priori afin de pouvoir dimensionner et justifier les ressources qui lui sont consacrées

Références

[1] Soussens M., Bosse S., Cabarbaye A., Health monitoring sur les satellites spatiaux, Lambdamu 19
 [2] Laulheret R., Cabarbaye A., Estimation de fiabilité en ligne d'un satellite en orbite, Qualita 2015
 [3] Couallier V, Gerville-Reache L, Denis I, Guide sur le Health Monitoring et les modèles de dégradation, StatXpert (2013)
 [4] Boussouf L., Cabarbaye A., Gajewski J.F., Esteves C., Barreyre C., Prediction of system premature ageing based on functional decomposition of time series repetitive motifs and non linear modeling, Bids' 16 (ESA)
 [5] Soussens M., Laulheret R., Cabarbaye A., Modèles de dégradation des batteries d'accumulateurs, Lambdamu 19