

HEALTH MONITORING SUR LES SATELLITES SPATIAUX

PROGNOSIS AND HEALTH MONITORING IN SATELLITE SYSTEMS

Marion Soussens, Sébastien Bosse et André Cabarbaye
Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
18, avenue Edouard Belin - 31401 Toulouse

André Cabarbaye
CAB INNOVATION
3, rue de la Coquille – 31500 Toulouse
www.cabinnovation.com

Résumé

Cet article se propose de montrer l'enjeu du Health Monitoring dans le domaine spatial et de présenter une démarche de mise en œuvre. Il est le fruit d'une action de recherche et développement menée par le CNES pour lever les difficultés méthodologiques du Health Monitoring et de la prise de décision avant d'en envisager une utilisation opérationnelle sur les satellites.

Summary

This article shows the issue of health monitoring in space and presents an approach to implementation. It is the result of a research and development action conducted by CNES on the methodological difficulties of Health Monitoring and decision making before considering operational use on satellites.

Introduction

Dépassant les frontières de la maintenance prédictive, le « Health Monitoring » recouvre le suivi de l'état de santé d'un système, de manière continue ou intermittente à partir d'observations directes ou indirectes, afin d'anticiper et prendre les meilleures décisions, quelle qu'en soit la nature.

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 par activation de ressources redondantes embarquées,
- le retrait de service dans le cadre de la LOS (Loi relative aux Opérations Spatiales) 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 démarrage de nouveaux programmes de développement assurant des fonctions ou services pérennes, relatifs à l'observation de la Terre ou aux Télécommunications par exemple.

Mené jusqu'alors de manière plus ou moins empirique, le processus décisionnel intègre dorénavant la mise à mort d'un objet ayant encore un certain potentiel afin de respecter une exigence réglementaire.

Aussi l'intérêt du « Health Monitoring », qui cherche à améliorer le diagnostic (état du satellite en orbite) et le pronostic (durée de vie résiduelle), s'en trouve singulièrement renforcé. Il contribue, en effet, 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 et la modélisation de l'ensemble de ses phénomènes de dégradation se révèlent cependant particulièrement complexes. C'est pourquoi le CNES a cherché, dans un premier temps, à lever toutes les difficultés méthodologiques de cette amélioration de la connaissance et de la prise de décision avant d'en envisager une utilisation opérationnelle sur ses systèmes spatiaux.

Méthode

A partir d'un recensement des divers phénomènes d'usure observés sur les satellites et d'un état de l'art des modèles théoriques de dégradation et de leur mise en œuvre dressé par des experts du monde académique, la démarche méthodologique envisagée consiste à associer à chaque phénomène un modèle théorique propre puis à regrouper ces derniers entre eux afin de constituer une sorte de macro modèle de dégradation d'un satellite complet.

Chaque phénomène de dégradation identifié a fait l'objet d'une caractérisation, en interrogeant les experts des différents métiers et en exploitant les données disponibles de retour d'expérience en opération ou en essai. Les moyens d'observation de ces phénomènes en orbite, par des canaux d'information directs ou indirects, existants ou susceptibles d'être embarqués, ont également été recensés.

Par ailleurs, l'apport du health monitoring en exploitation doit être évalué a priori afin de dimensionner au mieux les ressources qui lui sont consacrées. Aussi, a-t-il été envisagé de développer des simulateurs comportementaux de systèmes spatiaux, fondés sur les architectures de satellite et les modèles de dégradation envisagés.

Résultats

L'action de recherche et développement menée par le CNES a abouti à la rédaction d'un guide méthodologique du Health Monitoring et de la prise de décision sur les systèmes spatiaux [5]. Celui-ci comprend un panorama de l'état de l'art des modèles théoriques de dégradation, une typologie des équipements soumis à des phénomènes de dégradation en orbite et quelques exemples caractéristiques de modélisation de systèmes soumis à usure ajustée à partir de données de retour d'expérience. Par ailleurs, un simulateur comportemental d'un système spatial a été développé pour évaluer l'apport du Health Monitoring dans son contexte opérationnel.

1. Bref panorama de l'état de l'art des modèles théoriques de dégradation

La modélisation d'un processus de dégradation peut s'effectuer de diverses manières.

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 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 de ce dernier, pour connaître son état de santé au jour le jour, estimer son potentiel restant et agir en conséquence. Les conditions d'utilisation et d'environnement peuvent accélérer le processus de dégradation.

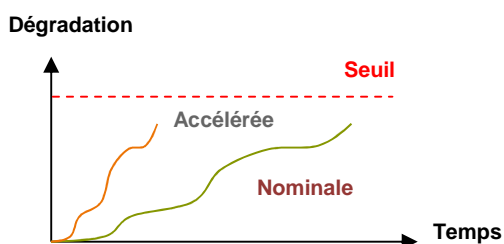


Figure 1. Processus de dégradation

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 [1]. Le phénomène de dégradation peut être stationnaire ou non-stationnaire et être influencé par les conditions environnementales [2].

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).

L'emploi de réseaux bayésiens dynamiques peut-être également envisagé pour modéliser des processus de dégradation. Ceux-ci permettent de représenter l'évolution des variables aléatoires en fonction d'une séquence discrète.

2. Phénomènes de dégradation des satellites

Une typologie d'équipements de satellite soumis à des phénomènes de dégradation a été établie en recherchant les possibilités de modéliser ces derniers et d'améliorer leur observabilité. Les principales familles sont décrites ci-après.

2.1. Générateur solaire

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). Toutefois, ces dégradations sont aléatoires et dépendent de l'orbite du satellite.

En terme d'observabilité, la perte d'une cellule n'a pratiquement pas d'effet, en raison de la présence de diodes by-pass, et celle d'un string n'est pas immédiatement visible sur le courant de charge des batteries en l'absence d'un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracking) permettant d'exploiter le GS à sa puissance maximale. Le suivi de l'état de charge des batteries peut informer sur l'état de dégradation du GS en tenant cependant compte des variations de consommation de la mission.

Outre les défaillances éventuelles, la dégradation d'un générateur solaire est monotone et doit pouvoir se modéliser par un processus gamma accéléré selon les conditions sur l'orbite.

2.2. Batteries d'accumulateurs

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.

Ces 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.

En termes d'observabilité, la capacité de la batterie est difficile à mesurer en orbite contrairement à sa force électromotrice (FEM) à pleine charge qui constitue également un indicateur de dégradation.

La dégradation de la capacité d'une batterie n'est pas strictement monotone car elle est le fruit de mécanismes physico-chimiques complexes. Elle doit pouvoir cependant se modéliser par un processus Gamma (monotone) ou par un processus de Wiener accélérés selon les conditions de profondeur de décharge (DOD) et de température.

2.3. Contrôle thermique

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 a alors un impact sur la fiabilité des équipements électroniques.

La dégradation du revêtement des radiateurs est monotone et doit pouvoir se modéliser par un processus gamma éventuellement accéléré selon les conditions sur l'orbite.

2.4. Propulsion chimique (mono ergol)

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. Afin de limiter la dégradation du catalyseur sous l'effet des contraintes thermiques, un préchauffage est réalisé, autant que possible, avant utilisation du propulseur (un démarrage à froid équivaut à environ mille démarrages avec préchauffage).

Outre l'épuisement des ergols, la dégradation du lit catalytique entraîne une baisse de performance du moteur.

La quantité d'ergol restante 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 (ΔV) prédits et constatés peut mettre en évidence une dégradation de la propulsion.

Au-delà de la durée de mission pour laquelle le propulseur a été qualifié par essais, les phénomènes de dégradation sont relativement complexes et de dynamique inconnue.

La méthode de Wilks [9] peut être utilisée pour évaluer un quantile de la quantité d'ergol restante, à partir de résultats de simulation, avec un certain niveau de confiance. Elle permet notamment, dans ce cas, de connaître le nombre de simulations nécessaire à cette estimation.

2.5. Propulsion électrique (ionique)

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.

Outre la surveillance des ΔV par le contrôle d'orbite, le potentiel de la cathode d'ionisation, le débit de xénon et des oscillations de courant, reflétant une instabilité du plasma, peuvent révéler une dégradation du moteur. A partir de ces observables, certaines signatures sont révélatrices de plages de dégradation plus ou moins importantes du propulseur.

Les différentes plages de dégradation observables par signature pourraient éventuellement constituer les états d'un modèle markovien.

2.6. Mécanismes

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.) ayant chacune leurs types de dégradation propres.

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).

La dégradation des mécanismes est monotone et doit pouvoir se modéliser par un processus gamma éventuellement accéléré selon les conditions environnementales.

2.7. Equipements électroniques

A l'exception de l'optoélectronique, l'électronique est généralement considérée sans usure (λ 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.)

La dose de radiation cumulée pourrait être considérée comme un paramètre d'accélération affectant les taux de défaillance.

Par ailleurs, l'hypothèse du taux de défaillance constant pourrait être remise en cause pour des composants très intégrés utilisés pour de longues missions. Couplant une loi exponentielle et une loi de Weibull, un modèle de fiabilité tel que celui de BERTHOLON [10] est parfois envisagé.

3. Exemple de modélisation de phénomènes de dégradation

Plusieurs phénomènes de dégradation ont pu être modélisés et faire l'objet d'un ajustement par la méthode du maximum de vraisemblance à partir de données opérationnelles et d'essais ou de données simulées.

Ainsi la dégradation de la dérive du courant de phototransistors utilisés dans des capteurs optiques d'actionneur gyroscopique, a pu être modélisée par un processus de Wiener non linéaire accéléré pour tenir compte de l'évolution de la température du satellite due à la dégradation progressive de ses surfaces radiatives. Cette modélisation a fait l'objet d'un article au colloque lambdamu 18 [6].

De même, un modèle de vieillissement de batteries d'accumulateurs basé sur un processus gamma non stationnaire, accéléré par un facteur d'Arrhenius pour la température et un facteur de type puissance inverse pour la profondeur de décharge a été proposé dans un second article au colloque lambdamu 19 [7].

Ces exemples ne sont pas repris ici et le lecteur est invité à se reporter aux articles correspondants. A partir de ces cas-tests, on peut cependant noter la faisabilité d'ajuster des modèles de dégradation relativement complexes sous réserve d'utiliser un outil d'optimisation globale pouvant s'affranchir des multiples optima de la fonction log-vraisemblance.

Pour chacun des paramètres du modèle, ou pour des fonctions calculées à partir de ces derniers (durée moyenne de la vie restante par exemple), des intervalles de confiance peuvent être établis par une méthode générique d'estimation par inversion de la matrice de Fisher [3].

Par ailleurs, le suivi d'un équipement permet d'obtenir une trajectoire de dégradation et donc un nombre de données substantiel. Le suivi d'un certain nombre d'équipements reste cependant nécessaire pour caractériser la variabilité au sein d'une même famille.

4. Evaluation de l'apport du Health Monitoring sur un système satellitaire

L'apport du Health Monitoring, ainsi que celui de l'ajout éventuel de matériel embarqué facilitant sa mise en œuvre, doit être estimé a priori afin de pouvoir dimensionner les ressources qui lui sont consacrées.

Aussi a-t-il été envisagé de simuler l'évolution de l'état de dégradation de satellites et leur exploitation opérationnelle, à partir des modèles constitués, afin d'évaluer l'impact de l'amélioration du diagnostic, du pronostic et de l'aide à la décision sur l'allongement de la durée d'exploitation et le taux de réussite de la désorbitation.

De même, le développement de simulateurs comportementaux étendus à l'ensemble de systèmes satellitaires (constellation), voire au processus de développement des systèmes de remplacement initié au regard de l'état des systèmes courants, a été envisagé afin d'évaluer cet apport en termes de disponibilité et de coût du service rendu sur un horizon glissant de très longue durée.

Le développement d'un tel simulateur relatif à une constellation de 4 satellites affectés par des phénomènes de dégradation simplifiés, au moyen d'une technique de simulation récursive hybride [8], a déjà permis d'envisager des gains substantiels apportés par le Health Monitoring, tant en termes de coût horaire du service rendu que de sa qualité (diminution significative des risques d'interruption de longue durée). Toutefois, ces gains dépendent énormément des caractéristiques du système concerné et peuvent difficilement être généralisés.

Un service satellitaire à vocation pérenne présente en effet des risques d'interruption en cas de pannes précoces du système en place ou d'aléas de développement du programme de remplacement. De même, il présente des risques d'emploi de ressources surabondantes avec des coûts additionnels d'opération.

Conclusion

En raison de sa complexité et de son observabilité limitée, le suivi d'un satellite complet, couvrant le diagnostic et le pronostic, ne sera jamais parfait.

Cependant, celui-ci peut être significativement amélioré pour aider à la prise de décisions à forts enjeux économiques dans le respect d'exigences réglementaires nouvelles s'imposant à tous pour limiter l'encombrement en orbite.

L'étude méthodologique présentée ici a permis de démontrer la faisabilité de cette amélioration et d'estimer son apport. Elle est suivie par une action de R&T menée actuellement avec les maîtres d'œuvres industriels afin de déboucher sur utilisation opérationnelle du Health Monitoring en orbite.

Le CNES espère ainsi améliorer la manière d'opérer les satellites dans le futur.

Références

- [1] Baussaron J., Mise au point de modèles prédictifs de fiabilité dans un contexte de dégradation associé à des profils de mission, thèse de doctorat, 2001.
- [2] Nikulin M., Gerville-Reache L., Couallier V., Statistique des essais accélérés, Hermes science, Lavoisier, 2007.
- [3] Cabarbaye A, Tanguy A, Bosse S (2012), Adjustment of complex probabilistic models and estimation of confidence intervals in a discrete manner, ESREL, Helsinki.
- [4] Karine E, S. Bosse, T. Laloix, Cabarbaye A, (2013), Prognosis and health monitoring applications in satellite systems, ESREL, Amsterdam.
- [5] Couallier V, Gerville-Reache L, Denis I, Guide sur le Health Monitoring et les modèles de dégradation, StatXpert (2013)
- [6] Bosse S, Quadri G, Gilard O, Cabarbaye A, Modèle prédictif de dégradation non linéaire dans des conditions d'environnements variées, LM 18 (2012)
- [7] Soussens M, Laulheret R, Cabarbaye A, Modèle de dégradation des batteries d'accumulateurs, LM 19 (2014)
- [8] Cabarbaye A, Karine E, Dimensionnement probabiliste et optimisation des systèmes par des modèles de simulation hybrides, LM 17 (2000)
- [9] WILKS, S. S., « Determination of Sample Sizes for Setting Tolerance Limits », The Annals of Mathematical Statistics, Vol.12, pp. 91-96, 1941.
- [10] Ziani R., Antoni M., Modélisation du vieillissement des appareils de signalisation par le modèle de BERTHOLON et optimisation de la maintenance, lambdamu 16, 7-9 octobre 2008, Avignon.