



Caractérisation de l'usure des composants électroniques et estimation de leur durée de fonctionnement avant défaillance (RUL : Remaining Useful Life)

André Cabarbaye
Cab Innovation
3, rue de la coquille, 31500
Toulouse, France
andre.cabarbaye@cabinnovation.com

Aurélien Cabarbaye
Cab Innovation
3, rue de la coquille, 31500
Toulouse, France
aurelien.cabarbaye@cabinnovation.com

Alain Bensoussan
Thales Alenia Space
26 avenue J-F. Champollion, 31037
Toulouse, France
alain.bensoussan@thalesalieniaspace.com

Olivier Gilard
CNES
18, avenue Edouard Belin, 31401
Toulouse, France
olivier.gilard@cnes.fr

Lip Sun How
AdvEOTec
6 rue Jean Mermoz ZA Saint Guénault
91080 Courcouronnes France
lipsunhow@advteotec.com

Fabio Coccetti
IRT Saint Exupéry
CS34436, 3 Rue Tarfaya, 31400
Toulouse, France
fabio.coccetti@irt-saintexupery.com

Résumé — Une méthodologie de caractérisation de l'usure des composants électroniques et d'estimation de leur durée de fonctionnement avant défaillance (RUL : Remaining Useful Life) a été développée dans le cadre de deux projets de recherche (RYTHMS et FELINE). Fondée sur des essais accélérés de composants (ou un retour d'expériences opérationnelles) et l'ajustement de modèle de dégradation, elle permet de prendre en compte le vieillissement (wear-out) et les pannes aléatoires (random) dans les analyses de fiabilité, du composant au niveau système. Cette méthodologie pourrait être utilisée pour enrichir les recueils de fiabilité de composants basés sur des taux de défaillance constants.

Mots-clés — Usure des composants électroniques, Modèles de vieillissement, Essais accélérés, Recueils de fiabilité

I. INTRODUCTION

Avec l'intégration toujours plus poussée des composants électroniques, l'hypothèse du taux de panne constant, considérée dans les évaluations de fiabilité, devient discutable car des phénomènes d'usure (wear-out) apparaissent après quelques années d'utilisation.

Cette usure se manifeste également dans les composants optoélectroniques dont la puissance optique se dégrade plus ou moins rapidement en fonction de la température de jonction et de la densité de courant injectée.

C'est la raison pour laquelle une méthodologie de caractérisation de la dégradation des composants par essais a été développée dans le cadre du projet RYTHMS financé par le programme de recherche Clean Sky 2 de l'Union Européenne pour évaluer la fiabilité d'opto-émetteurs-récepteurs intégrant des VCSEL (vertical cavity surface Emitting Laser), ainsi que du projet FELINE, de l'IRT-Saint Exupéry portant sur la robustesse des composants électroniques.

Menée sous différents niveaux de stress en jouant sur les paramètres influents, cette caractérisation permet d'élaborer un modèle de dégradation dans diverses conditions d'utilisation et d'environnement.

Ce modèle peut se transformer en modèle de fiabilité pour un domaine de dégradation acceptable caractérisé par un seuil propre à l'application.

Il peut être alors utilisé dans le cadre de l'estimation prévisionnelle de fiabilité pour estimer la probabilité de réussite d'une mission ou dans celui de la maintenance prédictive pour estimer la durée de fonctionnement avant défaillance (RUL : Remaining Useful Life) dans la mesure où l'état de dégradation est observable en ligne.

Outre les phénomènes de vieillissement, les pannes aléatoires (random) peuvent être également caractérisées en recueillant les instants de défaillance au cours des essais.

Cette méthodologie pourrait être utilisée dans les recueils de fiabilité pour prendre en compte le vieillissement des composants sujets à usure. Quand le niveau de dégradation d'un produit est observable, son suivi permet d'acquérir beaucoup plus d'information sur le phénomène d'usure que celui des seules durées de fonctionnement avant défaillance.

II. CARACTERISATION DE LA DEGRADATION PAR ESSAIS

Cette caractérisation de l'usure des composants consiste à identifier un observable de dégradation et les facteurs de stress influents, choisir un modèle de dégradation adapté, planifier et réaliser des essais puis ajuster le modèle à partir des résultats obtenus. Elle peut également se fonder sur l'exploitation de données opérationnelles.

A. Observable de dégradation et stress influents

L'identification d'un observable direct ou indirect de la dégradation et la connaissance des facteurs de stress influents est du domaine de l'expertise en composant.

La mesure de la dégradation peut être réalisée à différentes conditions de stress ou nécessiter le retour à des conditions standards. Les essais s'en trouvent alors complexifiés et l'observation en ligne de la dégradation plus difficile à mettre en œuvre.

Les niveaux des facteurs de stress peuvent être mesurés de manière directe ou indirecte, telle que la température de jonction à partir de celle du boîtier et de la résistance thermique, par exemple.

B. Choix du modèle

Pour caractériser une dégradation, deux familles de modèles peuvent être envisagées : les modèles continus et les modèles à espace d'états (ou multi-états).

Les premiers portent sur une grandeur physique, telle qu'une largeur de fissure, un courant de fuite ou un échauffement par exemple, dont on cherche à modéliser la trajectoire d'évolution.

Les seconds considèrent une suite d'états de dégradation plus ou moins prononcés et des lois de passage entre ces états. Ils rassemblent notamment des membres de la famille des modèles markoviens tels que les PDMP (processus markoviens déterministes par morceaux).

Un modèle de trajectoire d'usure, en fonction du temps ou du nombre de sollicitations, peut être alors établi et ajusté à partir d'observations réalisées sur un produit ou sur plusieurs de même type, comme l'illustre la figure 1.

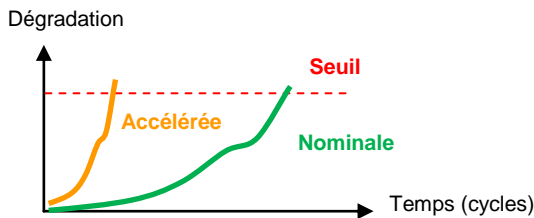


Fig. 1. Modèle de dégradation

Le phénomène de dégradation peut être accéléré par des conditions de stress [1]. Le Modèle Standard de Vie Accélérée (SVA), qui regroupe la plupart des modèles d'accélération utilisés en fiabilité (Arrhenius...), est alors à nouveau utilisable en faisant l'hypothèse que seul le facteur d'échelle de la loi de dégradation est modifié et non sa forme.

Le facteur d'accélération FA est alors similaire à celui considéré pour les pannes aléatoires mais avec des valeurs différentes de paramètre.

Si un seuil limite d'acceptabilité peut être fixé, le modèle de dégradation se transforme en modèle de fiabilité.

Les modèles de dégradation continue sont généralement fondés sur la famille des processus de Lévy¹ à accroissements

¹ Paul Lévy, mathématicien français (1886 -1971).

indépendants et stationnaires (chaque accroissement ne dépend que de l'intervalle de temps), dont le processus Gamma, le processus de Wiener et le processus de Poisson composé (dégradation liée à une accumulation de chocs).

1) Processus Gamma

Si la dégradation est croissante monotone, elle peut se modéliser par un processus Gamma. L'augmentation du niveau de dégradation entre deux instants t et t+Δt est alors une variable aléatoire modélisée par une loi Gamma de paramètres αΔt et β :

$$Z(0) = 0 \quad Z(t+\Delta t) - Z(t) \approx \text{Gamma}(\alpha\Delta t, \beta) \quad (1)$$

La dégradation croît alors à peu près uniformément de manière plus ou moins bruitée. Ce modèle peut être rendu non stationnaire au moyen d'une fonction croissante, telle qu'une fonction puissance, de la manière suivante :

$$\text{Gamma}(\alpha\Delta t, \beta) \rightarrow \text{Gamma}(m(t+\Delta t) - m(t), \beta) \quad (2)$$

avec $m(t) = p t^q$ et p et $q > 0$

Le modèle peut être également accéléré de la manière suivante :

$$\rightarrow \text{Gamma}(m(\text{FA} \times (t+\Delta t)) - m(\text{FA} \times t), \beta) \quad (3)$$

La définition d'un seuil d'acceptabilité permet de passer d'un modèle de dégradation à un modèle de fiabilité. Dans le cas d'un processus Gamma, la fiabilité correspond à la loi du premier temps de franchissement d'un seuil z_s qui a pour fonction de répartition :

$$F_S(t) = P(Z(t) \geq z_s - z_0) = 1 - R(t) \quad (4)$$

avec $Z(t)$ la loi $\text{Gamma}(m(t) - m(t_0), \beta)$

ou $\text{Gamma}(m(\text{FA} t) - m(\text{FA} t_0), \beta)$ dans le cas accéléré.

2) Processus de Wiener

Si la dégradation est globalement croissante mais non monotone, en présentant d'éventuelles phases de rémission passagères, elle peut se modéliser par un processus de Wiener. L'augmentation du niveau de dégradation entre deux instants t et t+Δt est alors une variable aléatoire modélisée par une loi normale de moyenne μΔt et d'écart type $\sigma\sqrt{\Delta t}$:

$$Z(0) = 0 \quad Z(t+\Delta t) - Z(t) \approx \text{Normale}(\mu\Delta t, \sigma\sqrt{\Delta t}) \quad (5)$$

La dégradation croît alors à peu près uniformément de manière plus ou moins bruitée. Ce modèle peut être rendu non stationnaire au moyen d'une fonction croissante, telle qu'une fonction puissance, de la manière suivante :

$$\rightarrow \text{Normale}(m(t+\Delta t) - m(t), \sigma\sqrt{\Delta t}) \quad (6)$$

avec $m(t) = p t^q$ et p et $q > 0$

Il peut être également accéléré de la manière suivante :

$$\rightarrow \text{Normale}(m(\text{FA} \times (t+\Delta t)) - m(\text{FA} \times t), \sigma\sqrt{\Delta t}) \quad (7)$$

La définition d'un seuil d'acceptabilité permet à nouveau de passer d'un modèle de dégradation à un modèle de fiabilité. Mais il n'existe pas de loi du premier temps de franchissement d'un seuil dans le cas des processus de

Wiener. La fiabilité peut cependant être estimée par simulation de Monte-Carlo, ainsi que l'espérance de la durée de vie restante.

3) Modèle de dégradation d'un composant

La plupart des phénomènes de vieillissement se traduisent par une dégradation monotone. Il est alors préférable d'utiliser un processus gamma qui ne nécessite pas l'emploi de la simulation de Monte-Carlo pour estimer la fiabilité.

Par ailleurs, le composant peut être affecté par plusieurs modes de vieillissement qui agissent sur le même observable de dégradation ou sur des observables différents. Le vieillissement peut être alors modélisé par différents phénomènes de dégradation, chacun d'entre eux modélisé par un ou plusieurs processus gamma non linéaires accélérés intégrant chacun leurs propres facteurs d'accélération relatifs aux stress les plus influents.

Mais le mieux est l'ennemi du bien², et la complexification des modèles ne se justifie que si elle améliore la qualité des estimations.

C. Planification des essais

Différentes stratégies d'essai peuvent être envisagées pour estimer simultanément les paramètres du modèle de dégradation et ceux des lois d'accélération.

Les essais peuvent être réalisés sur un ou plusieurs composants subissant des conditions de stress fixes ou évolutives. Menés sur plusieurs composants, ils intègrent les dispersions entre pièces d'un même type dans les résultats obtenus.

Illustrée par la figure 2, l'évolution des contraintes peut être croissante ou décroissante, continue ou échelonnée, cyclique ou aléatoire.

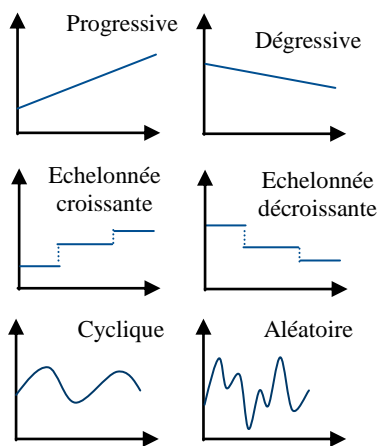


Fig. 2. Evolution des stress en essai

Les contraintes échelonnées permettent de garder un même niveau de stress entre deux mesures de dégradation. Si le niveau varie, le principe de Sedyakin [2] permet de déterminer un facteur d'accélération équivalent au profil de stress appliqué entre deux mesures.

$$Fa(S_{\text{Equivalent}}) = \frac{1}{t} \int_0^t Fa(S(u)) du \quad (8)$$

² Voltaire, La Bégueule, 1772.

Ce facteur d'accélération équivalent doit être calculé en considérant tous les niveaux de stress supportés entre deux mesures consécutives ou entre la dernière mesure et l'instant d'une défaillance ou de la fin de la période d'essai (censure à droite).

Si les composants sont testés à des conditions de stress fixes, il est nécessaire de prévoir suffisamment de niveaux pour pouvoir estimer les paramètres des lois d'accélération, soit au moins deux valeurs de température pour estimer l'énergie d'activation E_a de la loi d'Arrhenius, par exemple.

Dans le cas de contrainte évolutive, une stratégie exploratoire consiste à augmenter progressivement les niveaux de stress en fonction de l'occurrence des défaillances ou de la vitesse de dégradation observées. La contrainte appliquée croît alors de manière continue ou échelonnée.

Pour minimiser la durée des essais, une stratégie opposée à la précédente consiste à partir des conditions de stress maximales (à l'intérieur du domaine de qualification) puis à réduire progressivement les niveaux de stress appliqués en fonction de l'occurrence des défaillances ou de la vitesse de dégradation (après qu'une certaine proportion d'équipements soit tombée en panne, par exemple).

D'autres stratégies d'essais sont également envisageables telles que planification selon le critère de D-optimalité qui est abordée à la fin de cet article.

D. Traitement des résultats d'essais

Ce traitement a pour but d'ajuster le modèle de dégradation accélérée à partir des résultats d'essais afin de pouvoir estimer le potentiel de durée de vie restante d'un composant.

1) Ajustement du modèle de dégradation

Les paramètres du modèle de dégradation et des facteurs d'accélération sont ajustés globalement à partir des résultats d'essais. En effet, des données hétérogènes acquises dans diverses conditions de stress peuvent être traitées globalement par la méthode du maximum de vraisemblance sous réserve d'utiliser une technique d'optimisation performante.

La méthode du maximum de vraisemblance (maximum likelihood) consiste à rechercher la valeur des paramètres d'un modèle probabiliste qui maximise la probabilité d'occurrence des observations estimée par ce modèle. Dans le domaine continu, la vraisemblance est égale au produit des densités de probabilité des observations (ces dernières étant considérées indépendantes). En pratique, la recherche du maximum porte plutôt sur la log-vraisemblance qui est la somme des logarithmes des densités de probabilité.

Ainsi l'exemple de la figure 3 porte sur le traitement de résultats d'essais de composants optoélectroniques réalisé par l'outil d'optimisation hybride Gencab³ fondé sur des algorithmes génétiques associés au simplexe non linéaire (Algorithme de Nelder Mead).

Pour caractériser le vieillissement de composants de type VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser), le modèle de dégradation choisi est un processus Gamma non

³ Outil développé par Cab Innovation.

stationnaire accéléré en température et en courant dont le facteur d'accélération (loi d'Eyring) a pour expression :

$$Fa = (j_a/j_u)^n * \exp [Ea / K * (1/T_{ju} - 1/T_{ja})] \quad (9)$$

avec :

- J_u et J_a les densités de courant en utilisation (référence) et en conditions de stress,
- T_{ju} et T_{ja} les températures de jonction d'utilisation (référence) et en conditions de stress (en °K),
- K la constante de Boltzmann,
- Ea et n les paramètres du modèle d'accélération en température (énergie d'activation) et en densité de courant.

La température de jonction (T_j) se calcule à partir de celle du boîtier (T_c) par la formule suivante :

$$T_j = T_c + R_{th} (I_{nom} V_{nom} - P_{nom}) \quad (10)$$

avec :

- R_{th} la résistance thermique,
- I_{nom} le courant VCSEL
- V_{nom} la tension VCSEL
- P_{nom} la puissance optique

L'observable de la dégradation est la puissance optique du composant.

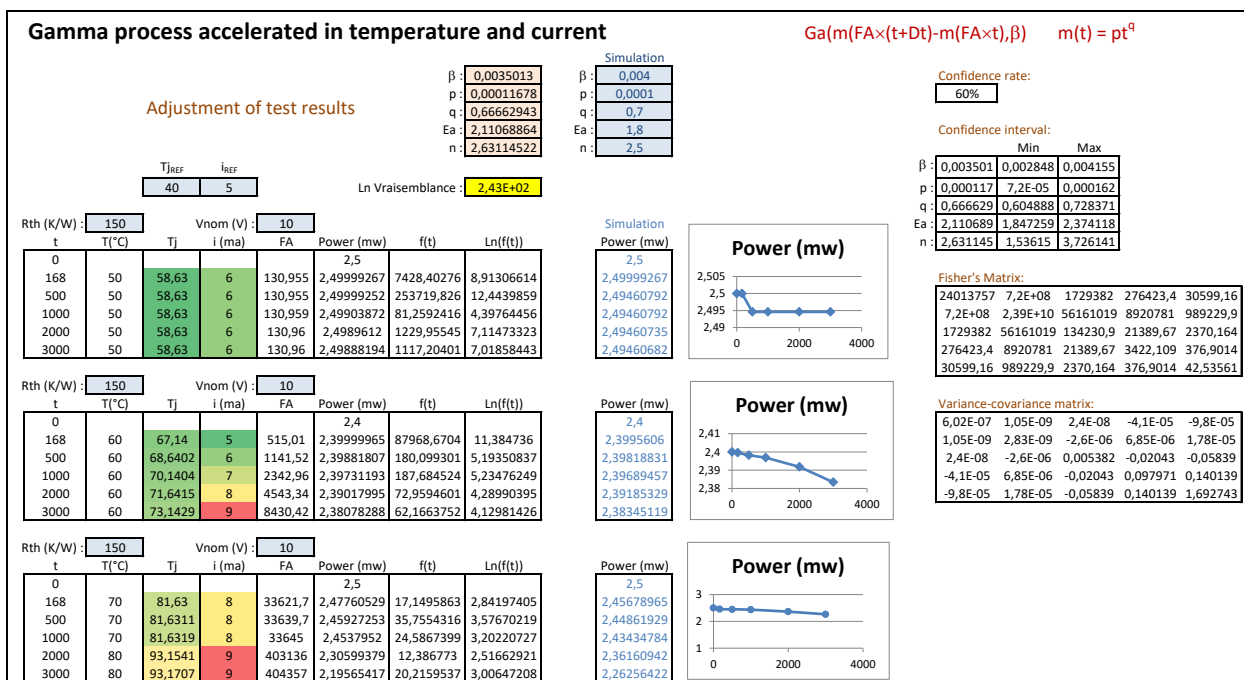


Fig. 3. Ajustement d'un modèle de dégradation sous Gencab

L'ajustement est réalisé ici à partir de dix trajectoires de dégradation de composants entre 0 et 3000 heures, dont seulement trois sont représentées sur la figure.

Les essais n'étant pas achevés au moment de la rédaction de cet article, ces trajectoires ont été préalablement simulées à différentes conditions de stress stabilisées ou évoluant selon des contraintes échelonnées. Ces données ont été obtenues en simulant un processus Gamma non stationnaire accéléré dont les cinq paramètres (β , p , q , Ea et n) sont préalablement fixés.

Les cinq paramètres utilisés pour la simulation sont à peu près retrouvés par l'ajustement qui estime ces paramètres avec des intervalles de confiance.

En effet, la méthode du maximum de vraisemblance permet d'obtenir des intervalles de confiance asymptotiques (valides pour plus d'une trentaine d'observations) sur les paramètres recherchés ou des paramètres qui en dépendent (la valeur d'un quantile par exemple).

Fondées sur la méthode de Wald [3], ces estimations nécessitent le calcul préalable de la matrice de Fisher. Cette

matrice peut se calculer de manière analytique, par double dérivation de la log vraisemblance puis calcul de l'espérance à partir des données observées.

L'inverse de la matrice de Fisher est la matrice de variance-covariance dont la diagonale est constituée de la variance de chacun des paramètres du modèle. Des intervalles de confiance encadrant ces derniers peuvent être alors calculés en considérant que ceux-ci sont distribués selon des lois normales.

De même, la variance d'une fonction des paramètres, telle qu'un quantile par exemple, peut s'exprimer à partir de son gradient si ce dernier est calculable.

Il est à noter que le calcul de la matrice de Fisher par dérivation de l'expression analytique de la log vraisemblance est propre à chaque modèle et généralement fastidieux. Aussi, une méthode numérique générique [4] applicable à tout modèle a-t-elle été développée et intégrée à l'outil.

2) Modèle de fiabilité

La définition d'un seuil d'acceptabilité de la dégradation permet de passer d'un modèle de dégradation à un modèle de fiabilité comme l'illustre la figure 4.

Dans le cas d'un processus Gamma, la fiabilité correspond à la loi du premier temps de franchissement d'un seuil z_s qui a pour fonction de répartition :

$$F_S(t) = P(Z(t) \geq z_s - z_0) = 1 - R(t) \quad (4)$$

avec $Z(t)$ la loi Gamma ($m(t) - m(t_0)$, β)

ou Gamma ($m(FA t) - m(FA t_0)$, β) dans le cas accéléré.

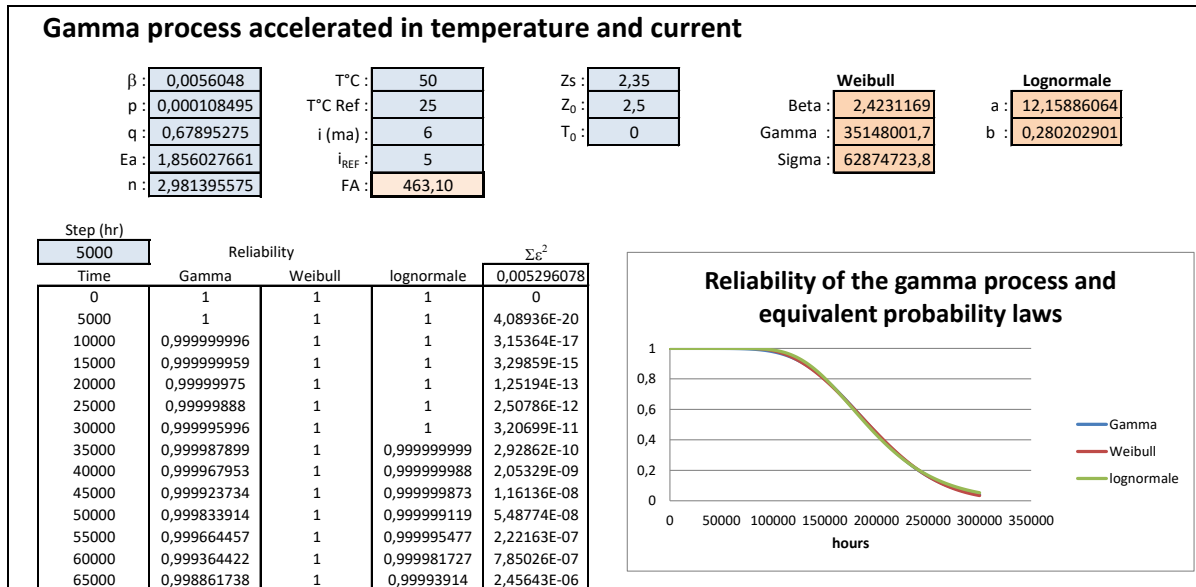


Fig. 4. Fiabilité au seuil Z_s

Une loi de fiabilité équivalente (une Weibull et une loi log-normale utilisée pour quantifier la fiabilité des diodes laser dans cet exemple) peut être alors ajustée par la méthode des moindres carrés afin de simplifier les évaluations de niveau supérieur.

Une loi de fiabilité relative aux pannes aléatoires (random) pouvant être observées au cours des essais peut être associée à la précédente (exponentielle à taux constant).

De même, la MRL (Mean Residual Life), soit l'espérance de la durée de vie restante du composant aussi appelée RUL (Remaining Useful Life), peut être estimée par intégration de la courbe de fiabilité obtenue en considérant le niveau de dégradation initial et le seuil du domaine acceptable.

A défaut de pouvoir être estimé lors de l'ajustement du modèle de dégradation, un quantile peut être estimé par simulation ou calculé en inversant la fonction de fiabilité de manière numérique (la réciproque de la fonction Gamma ne peut pas être employée car le paramètre α dépend du temps).

E. Du composant au système

La fiabilité d'un équipement électronique sujet à vieillissement ne peut plus s'estimer en sommant des taux de défaillance mais en faisant le produit de la fiabilité des composants à différents instants. La MRL peut être alors calculée par intégration.

De même la disponibilité des architectures de systèmes ne peut plus se calculer au moyen de modèles markoviens homogènes (à taux constants), mais peut être estimée par simulation de Monte-Carlo en simulant des durées de défaillances conditionnées à l'absence de panne à l'instant courant [5].

F. Planification optimale des essais

Outre les stratégies précédemment évoquées, le choix des conditions de stress appliquées en essai peut résulter de la D-optimalité.

Dans les plans d'expériences (design of experiments), la planification optimale (optimal designs) consiste à élaborer des plans expérimentaux qui sont optimaux par rapport à un critère statistique.

Le critère le plus souvent utilisé est la D-optimalité qui consiste à maximiser le déterminant de la matrice de Fisher (inverse de la matrice de variance covariance) afin de minimiser la variance des estimateurs et d'augmenter ainsi la précision des résultats obtenus à la fin des essais, ou d'en diminuer le coût car toute autre approche nécessite un plus grand nombre d'essais pour estimer les paramètres de la courbe de réponse avec la même précision.

La planification est séquentielle si l'on ne cherche qu'à déterminer les conditions de l'essai suivant ou par lot si les conditions de plusieurs essais sont définies simultanément.

Cependant l'estimation des paramètres d'un modèle nécessite un certain nombre de données pour pouvoir être réalisée. C'est la raison pour laquelle la méthode Caboum [6] associe une technique bayésienne à la D-optimalité afin de transformer une connaissance a priori en essais virtuels et pouvoir procéder à un ajustement dès le premier essai.

Un autre critère de planification optimale est de rendre robuste la courbe de réponse à toutes les conditions possibles, soit ici le modèle de dégradation à toutes les conditions d'utilisation et d'environnement. Après normalisation, la maximisation des distances minimales entre

ces conditions permet d'occuper l'espace de manière homogène.

Des travaux de R & D sont encore à poursuivre en optimisation [7] pour se doter de capacités de traitement à plusieurs niveaux afin de :

- faciliter la mise œuvre de la méthode Caboum fondée sur une double boucle d'optimisation,
- trouver la stratégie la plus adaptée à un modèle théorique proposé par les experts, en simulant des campagnes d'essais dont les résultats font l'objet d'un ajustement et dont les conditions de test sont optimisées au niveau supérieur.

G. Prise en compte du vieillissement dans les recueils de fiabilité de composants

Les recueils de fiabilité de composants électroniques (MIL-HDBK 217, FIDES...) sont fondés sur des taux de défaillance constants qui excluent tout phénomène d'usure. Valide jusqu'alors, cette hypothèse devient de plus en plus discutable quand des phénomènes de vieillissement de composants nouveaux apparaissent durant les missions. De même, des recueils de fiabilité de composants mécaniques (NPRD-95...) font la même hypothèse qui se révèle le plus souvent erronée.

Aussi, la méthodologie de caractérisation des composants présentée dans cet article pourrait être utilisée dans les recueils de fiabilité pour prendre en compte le vieillissement des composants sujets à usure.

Ces recueils pourraient intégrer des modèles de dégradation ou des modèles de fiabilité dans un domaine de fonctionnement donné (entre Z_0 et un seuil Z_s) de type Weibull ou log normale, afin de faciliter les estimations réalisées aux niveaux des équipements et systèmes et d'utiliser des modèles familiers à la communauté des fiabilistes.

III. CONCLUSION

La méthodologie proposée ici pour caractériser la dégradation des composants et modéliser leur fiabilité est précise et robuste.

Elle repose sur l'observation de l'évolution des dégradations durant des essais (ou en opération), qui est statistiquement beaucoup plus riche que celle des simples instants de défaillance et nécessite alors moins de pièces à tester.

Elle couvre tant les phénomènes de vieillissement (wear-out) que les pannes aléatoire (random).

Elle évalue précisément l'influence des stress en s'appuyant sur des résultats d'essais obtenus à différentes conditions environnementales ou d'utilisation, entre des composants d'un même type et/ou durant les tests de chacun d'entre eux.

Elle ne peut être mise en œuvre qu'au moyen d'outils d'optimisation performants.

La planification des essais et des conditions de stress appliquées peut être optimisée par la méthode D-optimale ou par l'utilisation de techniques robustes.

Des travaux de R & D sont encore à poursuivre pour améliorer les stratégies d'essais au moyen de capacités d'optimisation hybride multi-niveaux.

Décrite dans plusieurs ouvrages [8][9][10], cette méthodologie peut être mise au service des recueils de fiabilité de composants sujets au vieillissement. Des modèles de fiabilité de type Weibull ou lognormale peuvent être considérés si les domaines de dégradation acceptables sont préalablement définis par les technologues et les utilisateurs.

REFERENCES

- [1] Nikulin M., Gerville-Réache L., Couallier V., *Statistique des essais accélérés*, Hermes Lavoisier Paris 2007.
- [2] Sedyakin N.M., On one physical principle in reliability theory, Proceedings of Academy of Sciences of USSR, Technical Cybernetics, 3, 80-87, 1966.
- [3] Wald A., *Contributions to the Theory of Statistical Estimation and Testing Hypotheses*, Annals of Mathematical Statistics, vol. 10, no 4, 1939, p. 299-326
- [4] Cabarbaye A., Tanguy A., Bosse S., *Adjustment of complex probabilistic models and estimation of confidence intervals in a discrete manner*, ESREL 2012
- [5] A. Cabarbaye, R. Laulheret, *Usure des composants électroniques dans les estimations de fiabilité*, Lambda mu 21, Reims.
- [6] A. Cabarbaye, R. Laulheret, *Planification et exploitation des essais par la méthode Caboum*, Qualita 2017, Bourges.
- [7] Adrien & Aurélien Cabarbaye, *L'optimisation multidisciplinaire, l'autre enjeu du Big Data*, 2019, ISBN : 979-10-97287-05-4.
- [8] A. Cabarbaye, *Mise en œuvre des essais accélérés*, 2019, ISBN : 979-10-97287-06-1
- [9] A. Cabarbaye, *Implementing accelerated life testing*, 2019, ISBN : 979-10-97287-07-8.
- [10] Aurélien, Adrien & André Cabarbaye, *La fiabilité aujourd'hui*, 2020, ISBN : 979-10-97287-03-0.