

— Aurélien, Adrien et André Cabarbaye —

# Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive

Collection  
*La fiabilité en pratique*



Cab Innovation Editeur

## Avant-propos

Si les modèles d'accélération intéressent les fabricants de boissons dont les ventes dépendent des conditions météorologiques (ensoleillement, température, humidité...), ils ne peuvent pas être ignorés des concepteurs et utilisateurs de produits, tant les conditions environnementales et d'usages influencent la fiabilité. Une voiture ne vieillit pas de la même manière en Norvège ou au Sahara et si elle est conduite par une personne âgée ou par ses petits-enfants.

Permettant de passer d'une condition de stress à une autre, le facteur d'accélération apparaît bien mystérieux. Mais, il n'est pas l'apanage de quelques experts obscurs et repose sur des hypothèses qu'il est nécessaire d'explicitier et de confronter à des données opérationnelles ou d'essais pour être validées.

Sa justesse s'impose dans le cadre des essais d'endurance ou de fiabilité, réalisés pour démontrer la capacité d'un produit à assurer sa mission, dans un délai réduit et au minimum de coût.

L'erreur aboutit soit à des résultats optimistes en essai, qui ne se concrétisent pas durant la vie opérationnelle, soit à des conditions trop sévères en essai qui conduisent à l'impasse ou à des prolongations coûteuses.

Réalisés en fin de conception, les essais accélérés permettent d'établir un modèle prédictif qui conditionne l'estimation de fiabilité prévisionnelle et celle du potentiel restant (RUL : *Remaining Useful Life*) dans le cadre de la maintenance prédictive.

Répondant à un double objectif, ces essais se trouvent alors valorisés et leur coût est d'autant plus facile à justifier.

La maintenance prédictive permet d'améliorer la sécurité et la disponibilité du service tout en réduisant les coûts d'exploitation, la production de déchets et la consommation de ressources.

Elle est dorénavant imposée par les opérateurs de systèmes et par les usagers qui ont tendance à privilégier la prestation de service à l'acquisition et l'accumulation de produits.

La problématique des concepteurs ne concerne plus la tenue d'une période de garantie mais l'optimisation des usages jusqu'à la fin de vie des produits tout en générant un minimum de nuisance à l'environnement.

L'intelligence artificielle constitue-t-elle la panacée promise par certains experts en mégadonnées ou *data scientists* ?

Si le diagnostic a beaucoup profité des capacités du *Big data* (notamment pour détecter des signaux faibles), le pronostic reste une activité encore largement balbutiante.

Il nécessite, en effet, de disposer de modèles de fiabilité ou de dégradation dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées, qui ne peuvent être établis qu'à partir d'un retour d'expérience conséquent généralement tardif.

Un tel modèle étant également utilisé dans le cadre des essais accélérés, il apparaît opportun de rassembler ces deux activités dans un même ouvrage, d'autant qu'elles participent à l'émergence d'une économie propre et durable, qui ne peut se fonder que sur la rationalité scientifique et technique et non sur quelques effets de modes ou compromis discutables entre divers lobbys.

# Table des matières

<<<<

<b>Avant-propos</b> .....	<b>7</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>9</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Fondements théoriques</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1. Rappel de probabilité et statistique</b> .....	<b>15</b>
2.1.1. Probabilité et opérations logiques .....	15
2.1.2. Théorème des probabilités totales et théorème de Bayes .....	16
2.1.3. Variable aléatoire .....	18
2.1.4. Principales caractéristiques de la fiabilité .....	19
2.1.4.1 Fiabilité .....	20
2.1.4.2 Durée de vie.....	20
2.1.4.3 Taux de défaillance .....	21
2.1.5. Modèle non paramétrique (Kaplan Meier) .....	23
2.1.6. Lois de probabilité .....	24
2.1.6.1 Loi exponentielle.....	24
2.1.6.2 Loi de Weibull .....	24
2.1.6.3 Loi normale (Laplace-Gauss).....	26
2.1.6.4 Loi log-normale (Galton).....	26
2.1.6.5 Loi Binomiale .....	26
2.1.6.6 Loi de Poisson .....	27
2.1.7. Estimation.....	27
2.1.7.1 Intervalle de confiance .....	27
2.1.7.1.1 Intervalle de confiance d'une valeur moyenne.....	28
2.1.7.1.2 Intervalle de confiance d'une probabilité de défaillance	29
2.1.7.1.3 Intervalle de confiance d'un taux de défaillance .....	29
2.1.7.2 Ajustement .....	30
2.1.7.2.1 Maximum de vraisemblance .....	30
2.1.7.2.2 Intervalle de confiance asymptotique.....	32
2.1.7.2.3 Précision d'un ajustement.....	34
2.1.7.2.4 Adéquation et test statistique.....	35
2.1.8. Simulation de Monte-Carlo .....	37
2.1.8.1 Principe de la simulation .....	37
2.1.8.2 Simulation d'une variable aléatoire.....	38
2.1.8.3 Précision des résultats .....	39

2.1.9.	Inférence bayésienne .....	40
2.1.9.1	Démarche fréquentielle et bayésienne .....	40
2.1.9.2	Lois conjuguées.....	41
2.1.9.3	Lois quelconques .....	44
<b>2.2.</b>	<b>Modèles de fiabilité .....</b>	<b>44</b>
2.2.1.	Fiabilité de composants.....	45
2.2.2.	Fiabilité de blocs indépendants en série ou parallèle.....	47
2.2.3.	Systèmes markoviens (sans usure).....	48
2.2.4.	Systèmes non markoviens.....	50
<b>2.3.</b>	<b>Modèles d'accélération .....</b>	<b>51</b>
2.3.1.	Modèles Standard de Vie Accélérée (SVA).....	52
2.3.1.1	Lois d'accélération .....	53
2.3.1.2	Loi d'Arrhenius (thermique).....	54
2.3.1.3	Loi de Norris Landzberg (cyclage thermique).....	55
2.3.1.4	Loi de Peck (humidité) .....	56
2.3.1.5	Loi de Basquin (vibration).....	56
2.3.1.6	Loi d'Eyring (thermoélectrique).....	58
2.3.1.7	E-model (panne de diélectrique).....	58
2.3.1.8	Modèle d'accélération lié aux rayons cosmiques.....	58
2.3.2.	Lois d'accélération et mécanismes de défaillance .....	59
2.3.3.	Prise en compte de stress variables (principe de Sedyakin) .....	61
2.3.4.	Autres modèles d'accélération.....	62
2.3.5.	Ajustement d'un modèle de fiabilité accéléré .....	63
<b>2.4.</b>	<b>Modèle de dégradation.....</b>	<b>65</b>
2.4.1.	Processus de Levy.....	66
2.4.1.1	Processus Gamma.....	68
2.4.1.2	Processus de Wiener .....	68
2.4.1.3	Processus de Poisson composé .....	69
2.4.1.4	Processus Variance gamma .....	69
2.4.2.	Loi de premier franchissement d'un seuil.....	71
2.4.2.1	Dépassement d'un seuil par un processus Gamma.....	71
2.4.2.2	Dépassement d'un seuil par un processus de Wiener .....	71
2.4.2.3	Dépassement d'un seuil par un processus Variance Gamma	72
2.4.3.	Traitement sous Excel.....	72
2.4.3.1	Simulation de Monte-Carlo .....	72
2.4.3.2	Densité de probabilité .....	73
2.4.3.3	Ajustement .....	74
2.4.4.	Cas d'application.....	75

2.4.4.1	Dégradation monotone .....	75
2.4.4.2	Dégradation bruitée.....	77
2.4.4.3	Dégradation non monotone .....	78
<b>3.</b>	<b>Essais accélérés .....</b>	<b>81</b>
<b>3.1.</b>	<b>Les différents types d'essais .....</b>	<b>81</b>
3.1.1.	Essais accélérés .....	82
3.1.2.	Essais aggravés (HALT).....	82
3.1.3.	Essais de déverminage (HASS).....	83
3.1.4.	Essais d'endurance .....	83
3.1.5.	Essais de fiabilité .....	83
<b>3.2.</b>	<b>Conditions d'essais.....</b>	<b>83</b>
3.2.1.	Testabilité des produits .....	84
3.2.2.	Conditions d'accélération des essais.....	85
<b>3.3.</b>	<b>Mise en œuvre des essais accélérés .....</b>	<b>86</b>
3.3.1.	Questions préalables à se poser avant les essais.....	86
3.3.2.	Du composant au produit.....	87
3.3.3.	Du profil de vie aux conditions d'essais.....	88
3.3.4.	Processus de mise en œuvre.....	90
3.3.4.1.	En l'absence de phénomène d'usure .....	91
3.3.4.2.	En présence de phénomène d'usure .....	92
3.3.4.3.	Avec des facteurs d'accélération inconnus .....	93
3.3.5.	Stratégies d'évolution des stress en essais.....	94
3.3.6.	Exploitation de données hétérogènes.....	95
3.3.6.1.	Cas d'un modèle de fiabilité.....	95
3.3.6.2.	Cas d'un modèle de dégradation .....	96
3.3.7.	Démonstration de la tenue d'un objectif de fiabilité .....	98
3.3.7.1.	Cartes électroniques .....	99
3.3.7.2.	Equipements mécaniques.....	102
3.3.7.3.	Prise en compte d'une connaissance a priori .....	103
<b>3.4.</b>	<b>Dimensionnement optimal des essais.....</b>	<b>105</b>
3.4.1.	Dimensionnement avant essais.....	106
3.4.2.	Planification durant les essais .....	108
3.4.2.1.	D-Optimalité.....	109
3.4.2.2.	Méthode Caboum .....	111
3.4.2.3.	Distribution homogène des conditions d'essais .....	113
3.4.2.4.	Optimisation globale d'une campagne d'essais.....	114
<b>3.5.</b>	<b>Système mono coup.....</b>	<b>115</b>
3.5.1.	Traitement des résultats d'essais.....	115

3.5.2.	Planification des essais monocoups.....	116
3.5.2.1.	Méthode One-shot.....	116
3.5.2.2.	Méthode Bruceton.....	117
3.5.2.3.	Méthode des Probits.....	117
3.5.2.4.	Méthode Neyer.....	117
3.5.2.5.	Méthode Caboum.....	118
3.5.3.	Méthode des essais durcis.....	119
<b>4.</b>	<b>Maintenance prédictive.....</b>	<b>123</b>
<b>4.1.</b>	<b>Maintenance prédictive et Health Monitoring.....</b>	<b>123</b>
4.1.1.	Maintenance corrective.....	124
4.1.2.	Maintenance curative.....	124
4.1.3.	Maintenance palliative.....	124
4.1.4.	Maintenance préventive.....	124
4.1.5.	Maintenance prévisionnelle ou prédictive.....	125
4.1.6.	Health Monitoring.....	125
<b>4.2.</b>	<b>Traitement de données.....</b>	<b>127</b>
4.2.1.	Fusion de données.....	127
4.2.2.	Exploration de données.....	127
4.2.2.1.	Arbre de décision.....	130
4.2.2.2.	Réseaux de neurones.....	131
4.2.2.3.	Réseaux bayésiens.....	132
4.2.3.	Apprentissage automatique.....	133
<b>4.3.</b>	<b>Concepts et méthodes.....</b>	<b>134</b>
4.3.1.	Health Monitoring et prise de décision.....	134
4.3.2.	Diagnostic.....	136
4.3.3.	Pronostic.....	138
4.3.3.1.	Evaluation du potentiel restant.....	138
4.3.3.2.	Fiabilité en ligne d'un système.....	141
4.3.4.	Démarche de mise en œuvre.....	141
4.3.4.1.	Démarche.....	142
4.3.4.2.	Exemple d'application.....	143
4.3.5.	Evaluation de la qualité d'un pronostic.....	145
<b>5.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>147</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>149</b>
	<b>Table des illustrations.....</b>	<b>154</b>

# 1. Introduction

---

Le stress (température, vibration, humidité...) augmente le risque de défaillance et doit être considéré dans les modèles de fiabilité.

Mais, cette difficulté peut être également exploitée dans le cadre des tests d'endurance ou de fiabilité pour réduire la durée des essais et/ou le nombre de pièces à tester en augmentant les niveaux de stress par rapport à ceux de la vie opérationnelle.

Ce renforcement des conditions d'utilisation et d'environnement impose cependant deux exigences :

- l'augmentation des contraintes doit être limitée au domaine de qualification pour ne pas révéler d'autres phénomènes de défaillance ou de dégradation durant les essais que ceux qui seront observés en conditions nominales,
- les lois d'accélération permettant de passer des résultats d'essais aux performances opérationnelles doivent être établies pour pouvoir démontrer la capacité réelle des produits.

Cette modélisation de phénomènes physiques impose de revenir aux fondements théoriques des essais accélérés, qui sont développés dans la première partie de cet ouvrage.

Un guide pratique de mise en œuvre est ensuite proposé selon la situation d'essai rencontrée :

- au niveau du composant ou d'un ensemble regroupé en produit,
- en présence ou absence de phénomènes d'usure,
- avec ou sans connaissance précise des lois d'accélération.

Des techniques d'optimisation du dimensionnement et de la planification des essais sont enfin abordées pour en réduire le coût et la durée.

Les essais accélérés permettent non seulement de démontrer la capacité d'un produit à assurer sa mission pendant sa période de garantie, mais aussi d'établir son modèle comportemental durant toute sa durée de vie.

Ils constituent ainsi une activité stratégique dans une économie dorénavant plus tournée vers la prestation de service que le simple achat de produits.

Fondée sur un pronostic, la maintenance prévisionnelle ou maintenance prédictive (*predictive maintenance*) est subordonnée à la surveillance de l'évolution du niveau de dégradation d'une entité afin de retarder les

interventions ou inversement de les avancer pour éviter des dysfonctionnements.

Cette application singulière du suivi de bonne santé, ou *Health Monitoring* (HM), constitue le Graal des opérateurs car elle permet tout à la fois de réduire les coûts d'exploitation des systèmes, d'améliorer la sécurité et la disponibilité du service rendu aux usagers et de mieux respecter l'environnement, en diminuant la production de déchets et de rejets polluants ainsi que la consommation de ressources et d'énergie.

Aussi, fait-elle fantasmer certains décideurs qui peuvent s'illusionner de fausses promesses venant du *Big data*.

Certes, les techniques d'apprentissage et les réseaux de neurones ont permis d'améliorer le suivi de l'état des matériels (diagnostic) en sachant détecter des signaux faibles ou des signatures caractéristiques de l'état de dégradation.

Mais l'estimation d'un potentiel restant (pronostic) s'avère plus difficile car elle nécessite l'apprentissage préalable de tous les états de dégradation possibles avant défaillance, dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées.

La maintenance prédictive ne peut donc se suffire de l'intelligence artificielle que pour des produits peu sophistiqués fonctionnant dans des conditions stables ou des systèmes complexes dotés d'un long retour d'expérience opérationnel dans un marché de masse.

## 5. Conclusion

---

La possibilité d'accélérer les essais d'endurance ou de fiabilité, en augmentant les niveaux de stress par rapport à ceux de la vie opérationnelle, constitue une aubaine pour les concepteurs qui peuvent ainsi démontrer la capacité opérationnelle de leur produit à assurer une mission, à moindre coût et dans des délais réduits.

Mais pour être crédible, cette démonstration doit reposer sur des hypothèses explicites, justifiées par l'expérience ou validées par les essais.

Associant des lois de fiabilité ou de dégradation à des lois d'accélération, les modèles de vie accélérée reposent sur des fondements théoriques relativement solides, qui doivent s'adapter à chacune des situations en accord avec les experts et technologues des différents métiers (électronique, mécanique...).

Les modes de défaillance prépondérants sont à identifier préalablement ainsi que les contraintes qui accélèrent leur occurrence.

L'effet de contraintes combinées sur des modes de défaillance spécifiques est parfois difficile à appréhender.

Les moyens d'essai disponibles ne permettent pas toujours d'assurer une bonne représentativité des comportements par rapport à la vie opérationnelle.

Les modèles de vie accélérée sont très sensibles à la valeur de leurs différents paramètres et peuvent conduire à des résultats totalement erronés quand celle-ci est inexacte.

Ces paramètres peuvent être estimés par les essais eux-mêmes sous réserve qu'ils fournissent des données en quantité suffisante pour ajuster correctement les modèles au moyen d'outils performants.

Ces outils peuvent être également utilisés pour optimiser le dimensionnement préliminaire et la planification des essais afin d'en améliorer la précision des résultats ou diminuer l'ensemble des coûts afférents (nombre de pièces à tester, moyens et durée des essais, etc.).

Les essais accélérés permettent de construire, dès la phase de conception, des modèles de fiabilité ou de dégradation dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées, qui peuvent être réutilisés pour l'établissement

d'un pronostic en opération, dans le cadre du *Health Monitoring* et de la maintenance prédictive.

Un pronostic basé sur l'observation des dégradations est statistiquement beaucoup plus riche que lorsqu'il n'est fondé que sur un recueil de défaillances.

Les processus de Lévy sont bien adaptés à la modélisation des phénomènes de dégradation, tels que l'usure ou la propagation de fissures. Ils peuvent devenir non stationnaires, pour considérer une vitesse de dégradation variable, et accélérés, pour tenir compte des conditions d'utilisation et d'environnement.

Parmi ces processus, le processus Variance Gamma présente une grande souplesse pour représenter la diversité des phénomènes de dégradation. Mais sa fonction de vraisemblance inclut une fonction de Bessel dans son expression et peut avoir plusieurs optima locaux.

La maintenance prédictive ne se construit pas avec un peu d'intelligence artificielle et l'ajout de quelques capteurs, mais résultent du processus global de conception des systèmes.

Sa mise en œuvre consiste à enrichir la démarche classique de fiabilisation des systèmes par l'identification, l'observabilité, le suivi et la modélisation des phénomènes d'usure, afin de pouvoir établir un diagnostic suivi d'un pronostic en ligne.

L'intelligence artificielle permet d'améliorer significativement le diagnostic mais son apport est plus limité en ce qui concerne le pronostic qui requiert un apprentissage de tous les comportements opérationnels, dans toutes les conditions d'utilisation et d'environnement.

Des indicateurs de la qualité d'une prédiction peuvent être élaborés en séparant préalablement le jeu des données observées en données d'apprentissage et de validation.

Outre les difficultés de modélisation, l'observabilité des dégradations en présence de phénomènes d'usure est une dimension trop souvent oubliée des concepteurs alors qu'elle assure la faisabilité des essais et du pronostic en ligne.

# Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive

La maintenance prédictive constitue le Graal des opérateurs de systèmes car elle permet à la fois de réduire les coûts d'exploitation, d'améliorer la sécurité et la disponibilité du service et de respecter l'environnement en diminuant la production de déchets et la consommation de ressources. Mais sa mise en œuvre peine à se concrétiser.

Les techniques issues du Big data (réseaux de neurones, apprentissage automatique...), ont permis d'améliorer le suivi de l'état des matériels (diagnostic) en sachant détecter des signaux faibles ou des signatures caractéristiques d'un état de dégradation. Mais l'estimation d'un potentiel restant (pronostic) s'avère plus difficile car elle nécessite l'apprentissage préalable de tous les états de dégradation possibles avant défaillance, dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées.

La maintenance prédictive ne peut donc se suffire de l'intelligence artificielle que pour des produits relativement simples ou dotés d'un long retour d'expérience dans un marché de masse. Elle implique l'emploi d'un modèle prédictif capable de décrire l'évolution des produits dans diverses conditions de stress (température, vibration, humidité, sollicitation...), afin de pouvoir élaborer un pronostic à partir de l'état courant.

Un tel modèle est également utilisé dans le cadre des essais accélérés d'endurance ou de fiabilité servant à démontrer la capacité d'un produit à réaliser sa mission. Celui-ci permet de réduire la durée des essais et/ou le nombre de pièces à tester en augmentant les niveaux de stress par rapport aux niveaux subis pendant la vie opérationnelle.

Aussi est-il apparu opportun de rassembler les essais accélérés et la maintenance prédictive dans ce livre didactique qui vulgarise leurs fondements théoriques et propose des guides d'application pratique.



*Docteur ingénieur en aéronautique, Aurélien Cabarbaye mène une activité de R&D sur la maintenance prédictive applicable aux drones.*



*Ingénieur en informatique et électronique, Adrien Cabarbaye est un spécialiste du Big data et de l'optimisation multidisciplinaire.*



*Expert sénior en Sûreté de fonctionnement durant son activité au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), André Cabarbaye est le gérant de la société Cab Innovation.*

ISBN : 979-10-97287-12-2



9 791097 287139

Prix : 69 € TTC