

Préface

Prédire puis garantir la fiabilité d'un système industriel est un enjeu majeur pour les industriels des domaines de l'automobile, de l'aéronautique, de la défense mais aussi pour ceux du ferroviaire, des télécommunications, du nucléaire, du médical et bien d'autres. Mais c'est avant tout un enjeu majeur pour nous, utilisateurs au quotidien de ces équipements, qui doivent avoir une confiance absolue dans les informations transmises et les décisions prises en temps réel. Le développement croissant des objets connectés (IoT, robots et cobots, domotique, etc.), des systèmes autonomes (automobile, drone et demain avion et hélicoptère) va conduire à réduire de façon drastique l'intervention de l'homme au profit de l'intervention des systèmes mécatroniques. Tous ces systèmes ne pourront se déployer que si les utilisateurs ont une confiance absolue dans la fiabilité de ces équipements.

Ces équipements se décomposent en trois grandes fonctionnalités, une partie matérielle composée principalement de cartes électroniques (couplées à des systèmes mécaniques), de systèmes de télécommunication permettant le contrôle à distance et une partie logicielle embarquée temps réel permettant la mise en œuvre des équipements et la réalisation des tâches attendues.

Prédire et garantir la fiabilité des équipements électroniques est une tâche à la fois immense et sans fin. D'une part, le nombre de type de composants utilisés pour réaliser ces cartes est très élevé et d'autre part l'intégration de fonctionnalités innovantes et complexes dans les équipements nécessite de nombreux essais de fiabilité et de robustesse.

Grâce au soutien des pôles de compétitivité Astech et NextMove, de la filière Aéronautique Normandie NAE, des régions Normandie et Île-de-France, des chambres de commerce de Rouen et Versailles, des programmes ont pu être mis en œuvre et aboutir à des résultats exceptionnels (Audace, First-Mep, etc.).

Compte tenu de la richesse des résultats de ces trois ouvrages, je tiens à remercier très chaleureusement messieurs Abdelkhalak El Hami, David Delaux et Henri Grzeskowiak pour leur travail remarquable à la mise en œuvre de ces trois volumes ainsi que tous les auteurs qui ont consacré de nombreuses heures à mettre en forme tous leurs résultats de façon à ce que ces informations primordiales ne restent pas la propriété de quelques-uns mais soient partagées par le plus grand nombre d'ingénieurs, de techniciens, de chercheurs et d'étudiants. Ces trois volumes peuvent se lire séparément et couvrent à eux trois tous les aspects de la fiabilité, tout d'abord la prédiction, puis les tests et enfin les retours d'expérience.

Le volume 1 est consacré à la fiabilité prédictive pour estimer ou prédire les performances de fiabilité des systèmes.

Le volume 2 est dédié à la fiabilité expérimentale utilisant des outils et méthodes d'essais pour démontrer la fiabilité des systèmes.

Le volume 3 présente la fiabilité opérationnelle. C'est au cours de cette étape que l'on vérifie la performance de fiabilité des systèmes dans leurs vies réelles par une analyse des données terrain.

Je tiens à remercier l'ensemble des acteurs des programmes de recherche qui ont contribué à faire avancer cette science ainsi que les financeurs (État, régions) sans qui ces projets n'auraient pu aboutir et je fais le vœu que les membres du noyau dur mis en place dans ces programmes (Audace, First-MFP, etc.) continuent leur association car leurs compétences seront indispensables pour garantir la fiabilité des très nombreuses technologies qui vont émerger dans les années à venir et qui équiperont les systèmes mécatroniques de demain.

Philippe EUDELINÉ
Président de Normandie AeroEspace (NAE)

Avant-propos

Mars 2020, un tournant dans notre vie, dans l'industrie planétaire... La Covid-19 frappe le monde ! Cette pandémie a mis en évidence les **fragilités** de nos industries tout en exacerbant les paradigmes du développement, de l'innovation, de la compétition commerciale et de l'accélération des phases de recherche.

Plus que jamais, nous devons être **agiles** dans nos business plans américains, européens, asiatiques, mondiaux, tout en **sécurisant** l'utilisation de nos produits dans leur exploitation opérationnelle. Force est de constater les **défis** d'avoir à combiner les concepts de variabilité et de stabilité, de standardisation et d'accélération du développement des produits. Le monde « post-Covid » pousse l'ensemble des industries dans les derniers retranchements de l'ingénierie de la fiabilité.

Il est vrai que le mot « fiabilité » est quotidiennement utilisé comme cosmétique marketing sans vraiment se soucier du fondement scientifique sous-jacent ! Mais derrière ce mot se cache une science appliquée et validée par des analyses, des recherches et des personnes talentueuses.

Quel type d'approche fiabiliste un concepteur, un ingénieur, un manager peut utiliser dans son environnement professionnel ? Quel que soit le domaine industriel (aéronautique, spatiale, défense, automobile, domotique, etc.), comment est-il possible de concevoir un produit fiable plus rapidement tout en préservant les aspects sécuritaires ?

Les méthodes de conception évoluent sans cesse et la tendance est de mettre en œuvre de plus en plus de constituants très innovants dans un nouveau produit, pour lesquels un

retour d'expérience n'existe pas encore ou est insuffisant. Les frontières entre les domaines où il existe un retour d'expérience et les domaines inexplorés se déplacent continuellement. Les zones « conquises » sont celles pour lesquelles un retour d'expérience suffisant est intervenu permettant alors de faire appel à l'une des formes traduisant ou exploitant ce REX : des répertoires de valeurs typiques de défaillance dans des conditions d'emploi données, des valeurs caractéristiques pour des paramètres intervenant dans les lois de dégradation, etc. Pour les domaines non explorés, il faudra faire appel à des approches de validation basées sur l'expérimentation et, par conséquent, sur des essais physiques ; cela va être le cas lorsque l'un des critères suivants caractérise le produit en développement : nouveaux composants, nouveau design, nouvelles conditions d'emploi et/ou nouveaux procédés (ou altération des procédés) de fabrication.

Les actions de validation répondant à ce contexte de produit en très forte évolution, que l'on pourrait appeler « produit en révolution », sont basées sur l'expérimentation et il n'y a pas d'alternative. L'oublier conduira inévitablement le moment venu la réalité à se rappeler au bon souvenir du décisionnaire, à des coûts en termes financiers et de perte d'image de marque très élevés.

Cet ouvrage donne une vue d'ensemble des techniques pouvant être mises en œuvre pour tendre vers un produit mature dès le début de mise en exploitation de ce produit.

Le chapitre 1 présente les essais aggravés, qui permettent d'accroître les marges de conception des performances pour lesquelles il y a des enjeux à les agrandir. Cela doit rester une approche sélective à mettre en œuvre de façon circonspecte.

Le chapitre 2 présente les résultats d'une étude menée sur des condensateurs à film, très utilisés dans les produits, et pour lesquels le retour d'expérience est insuffisant.

Le chapitre 3 présente la méthodologie des essais accélérés, qui ont remplacé depuis au moins deux décennies les essais de fiabilité dédiés, compte tenu des coûts et des délais induits par ces derniers devenus incompatibles avec les exigences actuelles.

Le chapitre 4 présente la collection de normes AFNOR NF 50-144-1 à 6 décrivant la méthodologie de prise en compte de l'environnement dans un développement. Cette prise en compte permet de compléter la maturation du produit en conduisant le développement du produit pour qu'il soit apte à fonctionner et à endurer les valeurs maximales des environnements normaux du profil de vie spécifiés.

Il faut cependant remarquer que, malgré la bonne application des actions présentées dans les chapitres 1, 3 et 4, l'expérience montre qu'en début d'exploitation du produit, la fiabilité prédite par l'ingénierie de la fiabilité n'est pas immédiatement au rendez-vous.

Un délai est nécessaire pour que l'utilisateur final se forme à l'emploi du produit et assimile correctement les modes d'emploi, s'adapte à l'ergonomie du produit et surtout, se rapproche autant que possible des conditions d'emploi prises en compte en développement et décrites dans le cahier des charges puis dans la spécification de haut niveau d'assemblage du produit. Ce n'est qu'à la fin de cette période d'apprentissage que le produit aura la fiabilité prédite par l'ingénierie de la fiabilité.

Le chapitre 5 présente le développement de spécifications vibratoires pour les composants du groupe motopropulseur.

Le chapitre 6 présente quant à lui des travaux s'inscrivant dans la prise en compte de l'environnement mécanique, et en particulier la simulation en laboratoire de vibrations stationnaires mais non gaussiennes, comme la version 2019 de la norme CEI 60068-2-64 le prévoit.

Un modèle ne peut être utilisé valablement que dans un domaine validé par un retour d'expérience. Les calculs sont un ensemble d'opérations effectuées sur des symboles représentant des grandeurs physiques. Les simulations (ou modélisations) sont toutes les démonstrations ayant pour but d'évaluer à l'aide d'un moyen informatique les performances attendues pour une définition donnée du produit, définition décrite en général par un modèle numérique et/ou analytique, et dans un environnement donné (par exemple l'évaluation des performances aérodynamiques d'un avion dans une attitude de vol donnée, le comportement dynamique d'une carte électronique soumis à des vibrations sinusoïdales, etc.). Les modèles permettent de représenter :

- soit le produit proprement dit :
 - représentation partielle ou totale du produit ;
 - simplification par rapport au produit réel ;
 - type de représentation (3D, 2D, 1D, etc.) ;
 - constitution physico-chimique du produit (matériaux, composition chimique) ;
 - discrétisation du produit (géométrie, maillage, échantillonnage) ;
- soit les phénomènes auxquels le produit est soumis :
 - nature des interactions avec l'environnement ;
 - modèles concernant la répartition spatiale du phénomène (uniforme, ponctuel, loi de variation, etc.) ;
 - modèles concernant l'évolution temporelle du phénomène (stationnaire, harmonique, transitoire, loi d'évolution, conditions initiales) ;

- les conditions aux limites appliquées au produit ;
- soit le comportement du produit lorsqu'il est soumis à ces sollicitations :
 - loi de comportement et équations associées (linéaire, non linéaire, écoulement laminaire ou turbulent, déterministe ou probabiliste, etc.).

On regroupe sous le terme « essais » toutes les démonstrations basées sur l'utilisation de spécimens du produit plus ou moins conformes à la définition à qualifier, et mis en œuvre dans des conditions plus ou moins représentatives des conditions d'exploitation du produit.

Les pratiques actuelles de la validation en cours de développement sont constituées d'allers-retours conception/simulation avec prise en compte de données réelles, voire d'éléments réels dans les boucles de validation : on parle alors de *Hardware In the Loop* (HIL). Le constructeur automobile BMW a par exemple utilisé cette technique dans la mise au point de sa « direction active ». Il s'en est servi pour simuler le changement de file d'un véhicule virtuel, et corriger automatiquement et en temps réel la mauvaise trajectoire. Finalement, un gain de temps et d'argent !

En fonction du degré de représentativité des spécimens à la définition à qualifier, l'on distingue :

- les essais de mise au point utilisant des maquettes et permettant de démontrer le bien-fondé d'un choix technologique, de préciser le réglage de certains paramètres et de détecter le plus en amont possible des défauts de conception ;
- les essais de qualification utilisant des prototypes représentatifs de la définition à qualifier.

En fonction du rang, dans l'arborescence-produit, du constituant concerné par l'essai, l'on distingue :

- les essais système, portant sur le système complet ou sur une grande partie du système ;
- les essais produit, portant sur l'un des constituants du système, quel que soit son rang dans l'arborescence-produit.

En fonction de l'étendue du domaine fonctionnel à essayer, l'on distingue les essais élémentaires, portant sur la vérification d'une ou de quelques caractéristiques fonctionnelles (par exemple essai de fiabilité, essai de l'élaboration des ordres de commande en fonction des caractéristiques inertielles, etc.).

De plus en plus souvent, les essais, destructifs ou non, sont complétés ou validés par une phase virtuelle au laboratoire. Ces essais virtuels remplaceront-ils un jour les essais réels ? De quels outils avons-nous besoin pour réaliser une campagne d'essais correcte ? Des éléments de réponses ont été donnés par un spécialiste des essais et par un concepteur de logiciels.

Pour conclure, il y a un « avant » et un « après » Covid-19. Les défis de fiabilité de nos industries à adresser dans cette nouvelle période qui s'ouvre sont importants. Le contexte mondial, mais aussi les objectifs écologiques, durables et d'empreinte carbone neutre sont les prochaines étapes d'une compétition économique farouche pour la prochaine décennie. Les auteurs espèrent que ce volume consacré à la fiabilité opérationnelle appliquée à l'industrie donnera les bons réflexes et orientera les lecteurs vers les bonnes pratiques pour les aider à concevoir efficacement et prendre les bonnes décisions.

Cet ouvrage est dédié à toutes les personnes qui ont perdu un être cher pendant la pandémie de Covid-19 (2020-2021) dans le monde.