



HAL
open science

Développement d'une méthodologie d'identification des facteurs influents

Mohamed Rabhi, Bruno Castanier, Laurent Saintis, Arnaud Tinguy,
Mohamed Anis Ben Abdessalem, Frédéric Bristiel

► To cite this version:

Mohamed Rabhi, Bruno Castanier, Laurent Saintis, Arnaud Tinguy, Mohamed Anis Ben Abdessalem, et al.. Développement d'une méthodologie d'identification des facteurs influents. 22-ème congrès de Maitrise des risques et sureté de fonctionnement- Lambda-Mu 22 "Les risques au cœur des transitions", Institut de maitrise des risques, Oct 2020, Le Havre, France. pp.284. hal-03117465

HAL Id: hal-03117465

<https://univ-angers.hal.science/hal-03117465>

Submitted on 21 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Développement d'une méthodologie d'identification des facteurs influents : Design Failure Mode Effect Analysis and Stress Investigation

Mohamed RABHI

LIEBHERR Aerospace

Laboratoire Angevin de Recherche en
Ingénierie de Système, Université d'Angers
Toulouse, France

mohamed.rebhi@etud.univ-angers.fr

mohamed.rabhi@liebherr.com

Laurent SAINTIS

Laboratoire Angevin de Recherche en
Ingénierie de Système, Université d'Angers
Angers, France

laurent.saintis@univ-angers.fr

Mohamed Anis BEN ABDESSALEM

Laboratoire Angevin de Recherche en
Ingénierie de Système, Université d'Angers
Angers, France

mohamedanis.benabdessalem@univ-angers.fr

Bruno CASTANIER

Laboratoire Angevin de Recherche en
Ingénierie de Système, Université d'Angers
Angers, France

bruno.castanier@univ-angers.fr

Arnaud TINGUY

LIEBHERR Aerospace
Toulouse, France

Arnaud.tinguy@liebherr.com

Frédéric BRISTIEL

LIEBHERR Aerospace
Toulouse, France

frederic.bristiel@liebherr.com

Résumé : L'identification des principaux mécanismes d'endommagement et des niveaux de sollicitations est l'un des points clés pour l'élaboration des modèles de fiabilité dans un contexte d'essais accélérés. La méthode proposée est une extension de méthodes existantes permettant un calcul intermédiaire de la probabilité d'occurrence pour chaque défaillance en estimant les effets d'intégration système et ainsi les dépendances mutuelles de chacun des composants.

Mots-clés : Prélèvement d'air, vanne, solénoïde, DFMEA, FMMEA, REX, mécanismes d'endommagement, facteurs influents, analyse bidirectionnel, avis d'expert, probabilité d'occurrence intermédiaire.

Abstract: The identification of the main damage mechanisms and the stress levels is one of the key points for the development of reliability models in the context of accelerated tests. The proposed method is an extension of existing methods allowing an intermediate calculation of an intermediate occurrence probability for each failure by estimating the effects of system integration and thus the mutual dependencies of each of the components.

Keywords: DFMEA, FMMEA, REX, damage mechanisms, preponderant factors, bidirectional analysis, expert opinion, intermediate occurrence probability

I. CONTEXTE INDUSTRIEL

La société LIEBHERR AEROSPACE Toulouse (LTS) est spécialisée dans le développement, la production et la maintenance des systèmes d'air. Le conditionnement d'air prélevé au niveau des moteurs, nécessite l'utilisation de vannes électropneumatiques. Ces vannes assurent l'alimentation des systèmes de conditionnement d'air, de régulation de pression cabine et de dégivrage des ailes des avions.

Les vannes électropneumatiques doivent présenter un haut niveau de fiabilité afin de garantir la réalisation de ces fonctions critiques au sein d'un avion tout en assurant les performances de consommation énergétique de l'avion. Le système d'air représente de 1 à 2% de la consommation totale de carburant de l'avion, ce pourcentage peut varier entre 3 et 10 % en cas de défaillance d'une des vannes. Ainsi, le système d'air engendre une consommation plus élevée de carburant pour maintenir le débit nécessaire aux consommateurs d'air et provoque une diminution de la poussée du moteur [1]. Par conséquent la température d'échappement augmente et rend le réacteur de plus en plus chaud ce qui réduit sa durée de vie.

II. INTRODUCTION

L'industrie aéronautique est confrontée à des défis et des contraintes budgétaires majeures qui motivent les mesures de réduction des coûts. Les coûts de maintenance corrective sont responsables de 12 à 15% du coût global de possession d'un avion, principalement par rapport à l'indisponibilité opérationnelle occasionnée [2]. Des moyens de réduction de cette indisponibilité sont l'amélioration du diagnostic et de la

correction des problèmes, un calendrier de maintenance optimisé en fonction de son impact sur la disponibilité opérationnelle et la durée de vie des unités fonctionnelles.

Dans cette recherche de réduction des coûts, la stratégie de la société est de standardiser ces vannes de prélèvement d'air sur tous les types d'avion et de mieux maîtriser les défaillances afin de les anticiper en renforçant les analyses prévisionnelles de durée de vie notamment sur les paramètres des différentes sollicitations influentes appliquées dans un environnement sévère du moteur de propulsion de l'aéronef. Les contraintes liées à cet environnement sont d'autant plus importantes que les dernières générations de moteur ont des températures de fonctionnement bien plus élevées. De plus, l'évaluation d'une fiabilité prévisionnelle est rendue encore plus délicate au vu des variations constantes de ces facteurs environnementaux au cours d'un vol, ne permettant même pas d'en identifier les plus importants.

L'objectif de cette thèse est de présenter une méthodologie d'investigation et d'analyse des sollicitations de systèmes pour leur évaluation de la fiabilité prévisionnelle lorsque leurs profils de mission opérationnelle sont très variés. Cette méthodologie sera par la suite appliquée à des vannes de prélèvement d'air d'un moteur d'avion, ici les sollicitations variant fortement en fonction des divers programmes. Son concept repose sur l'identification et la caractérisation des sollicitations prépondérantes basées sur des modèles standards de vie accélérée.

Afin de fournir une prévision précise de la durée de vie utile restante d'un produit, il est essentiel de comprendre ce qui cause des dommages et comment les dommages se manifestent dans le produit. Pour repérer la cause première de la défaillance, il est nécessaire de connaître non seulement le composant hôte de la défaillance, mais également le mécanisme de défaillance qui la provoque. Si les mécanismes de défaillance ne sont pas connus, les données collectées pour la surveillance et l'estimation des durées de vie peuvent être mal sélectionnées, divergentes et ne représentent pas la vie réelle du système. Ainsi les modèles d'estimation de la durée de vie développés seront erronés.

La capacité, ainsi, de repérer les comportements anormaux, les mécanismes d'endommagement et leurs facteurs sollicitant associés est le critère de sélection des méthodes à s'en servir pour l'analyse des pannes.

Ce travail s'instaure dans cette optique. Dans les sections III et IV, nous présenterons la méthode Design Failure Mode Effect Analysis (DFMEA) et ses limites, notamment utilisée chez LIEBHERR durant la phase de conception des systèmes pour la détermination des pannes potentielles et ses limites en fonction des données de retour d'expérience. Dans la section V, on présentera notre proposition Design Failure Mode Effect Analysis and Stress Investigation (DFMEA-SI), qui repose sur une investigation avancée des mécanismes de défaillance inspirée par la méthode FMMEA Failure Modes, Mechanisms and Effects Analysis. La méthodologie sera déployée, dans la section VI, pour l'analyse de défaillance d'un solénoïde de vannes de prélèvement d'air moteur d'avion.

III. METHODE EXISTANTE : DESIGN FAILURE MODE EFFECT ANALYSIS

Dans le cycle de vie d'un système, plusieurs mécanismes de défaillance peuvent être activés par différents paramètres environnementaux et opérationnels agissant à différents niveaux de stress, mais en général, seuls quelques paramètres opérationnels et environnementaux et mécanismes de défaillance sont responsables de la majorité des défaillances. Les mécanismes de haute priorité sont ceux qui combinent fortement les occurrences et la gravité. La hiérarchisation des modes de pannes offre une opportunité d'utilisation efficace des ressources pour la détermination des mécanismes d'endommagement critiques. Dans cette section, une discussion de l'approche DFMEA, FMMEA standards est présentée, suivie des limitations majeures de ces deux méthodologies.

A. DFMEA : Design Failure Mode Effect Analysis

L'armée américaine a commencé à utiliser la FMEA (Failure Mode Effect Analysis) dans les années 1970 et, en 1974. Un document de référence : «MIL-STD-1629: procédures pour effectuer un effet de mode de défaillance et une analyse de criticité» a été produit. En 1990, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) a recommandé l'utilisation de la DFMEA : Design Failure Mode Effect Analysis pour l'examen de la conception (Teoh & Case, 2005). La DFMEA, en tant que méthodologie de conception formelle, a été proposée pour la première fois par la NASA en 1963 pour leurs exigences évidentes de fiabilité.

Le développement de la DFMEA nécessite l'étude de toutes les fonctions du système afin de déterminer toutes les sources de défaillance en phase de conception. Elle permet l'investigation des modes de panne potentiels du système associés aux composants les plus défaillants et la détermination de leurs taux de défaillance prévisionnels.

Elle permet l'évaluation des risques dans une mesure préventive. En général, la DFMEA est utilisée pour repérer les faiblesses de la conception et du processus de production du produit dans les premiers stades avant de passer à la production en série pour permettre au produit d'avoir une meilleure qualité et fiabilité. Elle permettra a priori de

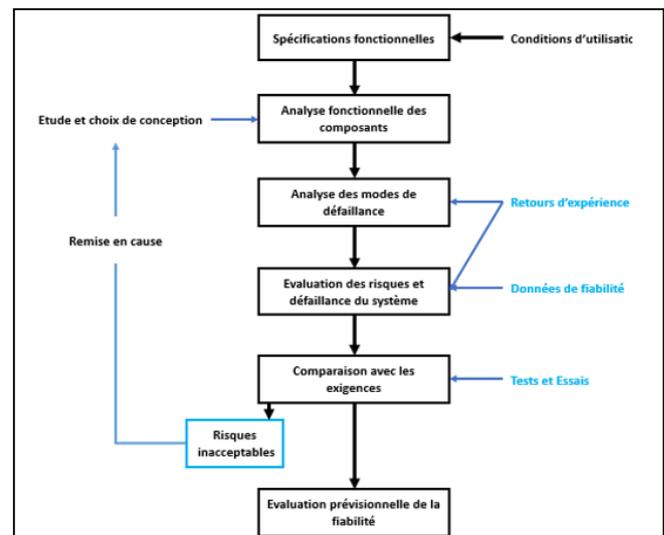


Fig. 1. Démarche de la DFMEA pour la détermination des pannes dominantes [2]

répondre aux besoins exprimés dans le cadre de cette thèse afin d'investiguer toutes les défaillances susceptibles d'exister pour les systèmes étudiés. La logique du processus de DFMEA est généralement comme décrite dans la Fig. 1.

Une analyse fonctionnelle doit être développée dans un premier temps. Toutes les fonctions principales du système sont détaillées et associées aux différents requis. Ensuite, pour chaque fonction, une liste des conditions de bon fonctionnement est développée afin de satisfaire à l'exigence fonctionnelle. Toutes les causes potentielles de non-respect des requis sont évaluées comme des modes de défaillance et associées aux composants. Un schéma explicatif est illustré dans la Fig. 2.

Les modes de défaillance et leurs effets sont classés selon :

- Une probabilité de gravité correspondant à l'effet de la panne sur le système englobant les composants défaillants.
- Une probabilité d'occurrence ou les causes à forte probabilité peuvent conduire à des actions pour empêcher ou réduire l'impact de la cause sur le mode de défaillance.
- Une probabilité de détection qui met en évidence la capacité de tests spécifiques à confirmer que le mode de défaillance pourrait être identifié.

Les probabilités d'occurrence, de détection et de gravité sont transférées à une échelle représentative de 1 à 9. La borne minimale de l'échelle correspond aux composants les moins défaillants en terme de gravité et gravité et présentant aucun moyen de détection des pannes (respectivement gravité = 1, occurrence = 1 et détection = 1).

La DFMEA assure également le suivi des améliorations grâce à des réductions du numéro de priorité de risque (RPN) calculé par la multiplication des trois paramètres présentés avant : occurrence, gravité, détection comme illustré dans la Fig. 2.

En comparant les RPN associés aux composants avant et après les améliorations conceptuelles, une stratégie d'atténuation des risques peut être mise en évidence en fonction des composants les plus défaillants.

En raison de confidentialité, les taux de défaillances et les défaillances sont donnés à titre indicatif dans la Fig. 3.

A l'échelle de la vanne, les rangs de sévérité sont fixés selon la gravité de chaque panne sur le fonctionnement global du système d'air. Les pannes potentielles du système (vanne de prélèvement d'air) sont prédéterminées et leurs probabilités de sévérité sont fixées. Grâce à la détermination de la panne du système global qui découle de la panne du composant du sous-système, la probabilité de sévérité générée pourrait être lue directement à partir de l'abaque développé en interne [1].

Probability of failure	Possible failure rates	Rank
Extremely high: Failure almost inevitable	\geq in 2	10
Very high	1 in 3	9
Repeated failures	1 in 8	8
High	1 in 20	7
Moderately high	1 in 80	6
Moderate	1 in 400	5
Relatively low	1 in 2000	4
Low	1 in 15,000	3
Remote	1 in 150,000	2
Nearly impossible	\leq 1 in 1,500,000	1

Fig. 3. Critères de classement des défaillances par occurrence

Les moyens de détection de panne pour les sous-systèmes traités dans le cadre de cette thèse sont essentiellement durant la phase de réparation. Ils sont principalement les tests de continuité électrique, les inspections visuelles et les tomographies pour les solénoïdes et les mesures de pression de fuite pour les membranes de régulation de pression.

La conception et l'encombrement entre les composants ne permettent pas de disposer d'autres moyens de détection. Un abaque de détection est aussi développé pour les pannes conventionnelles des composants [1].

La problématique est essentiellement la détermination de la probabilité d'occurrence des composants en pannes. La classification des modes de pannes les plus critiques est gouvernée ainsi par la probabilité d'occurrence puisque la sévérité et la détection sont à priori connues (abaques interne).

Les pannes des sous-systèmes et leurs composants sont, à leur tour, connues à partir des historiques des déposes des systèmes similaires de point de vue technologique dans le cas d'un produit neuf ne disposant pas encore de déposes.

Pour chaque défaillance « conventionnelle », un code est attribué pour standardiser l'exploitation des fichiers du retour d'expérience [1].

Si aucun produit similaire ne dispose de retour d'expérience, la probabilité d'occurrence des pannes du nouveau produit est déterminée à priori. Si une similarité entre produits est disponible, les probabilités d'occurrence des défaillances des composants sont déterminées à partir des retours d'expérience du produit déjà en service. Les déposes préventives ne sont pas prises en compte lors du calcul des occurrences.

Toutes ces données doivent être inscrites dans la structure de la Fig. 4.

B. FMMEA: Failure Modes, Mechanisms and Effects Analysis

Cassanelli et al. [3] ont montré que l'étude des mécanismes de défaillance enrichit la DFMEA ordinaire.

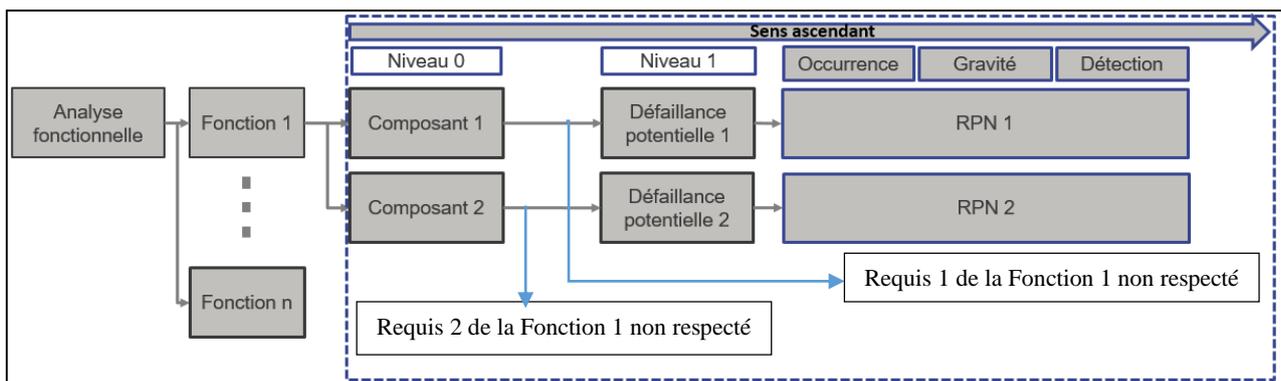


Fig. 2. Méthodologie générale de la DFMEA

Fonction			Mode de défaillance	Cause potentielle	Manifestations de la cause potentielle	composant	Occurrence	Méthodo de détection	Détection	Impact sur sous-système	Impact sur système	Sévérité	RPN	Amélioration conceptuelle	Nouveau RPN	
ID	Description	Requis														

Fig. 4. Structure de la DFMEA

La méthodologie d'analyse des modes, des mécanismes et des effets de défaillance (FMMEA) proposée par Cassanelli et al. [3] remédie aux faiblesses du processus DFMEA traditionnel. La méthode est basée sur la physique des défaillances (Physics of Failures : PoF) pour évaluer les causes profondes des défaillances et les mécanismes de défaillance d'un produit donné. La physique de la défaillance est une approche qui utilise la connaissance des mécanismes d'endommagement et la maîtrise du cycle de vie d'un produit (solicitations) pour évaluer la fiabilité du produit. La méthodologie de PoF est basée sur l'identification des mécanismes de défaillance potentiels et des sites de défaillance du système [6]. La méthode FMMEA est basée sur une compréhension des relations entre les exigences du produit, les caractéristiques physiques du produit, les interactions des matériaux du produit avec les sollicitations et leur influence sur la sensibilité du produit à la rupture par rapport aux conditions d'utilisation [7]. Elle partage la même méthodologie de développement que la DFMEA comme montre la Fig. 5. La différence stratégique entre ces deux méthodes est que la FMMEA ne s'intéresse qu'aux pannes repérées en service (durant la vie réelle du système). La classification des principaux modes de pannes et des mécanismes d'endommagement se fait par le RPN.

IV. LIMITATIONS :

Comme présenté ci-dessus, la probabilité d'occurrence ne prend pas en compte les avis des experts et se limite seulement à l'analyse des retours d'expérience disponibles (manquants) pour la FMMEA et des produits similaires pour la DFMEA. En plus, la méthode RPN, conventionnelle et largement adoptée dans l'analyse de la fiabilité, présente trois lacunes principales, à savoir :

- (1) il y a un problème d'échelle de mesure;
- (2) la gravité, l'occurrence et la détection ne sont pas considérées comme étant pondérées les unes par rapport aux autres en termes de risque;
- (3) elle perd certaines informations que les experts fournissent pour avoir les informations précieuses.

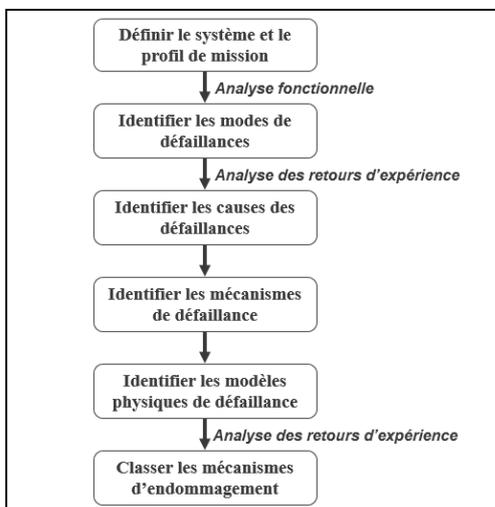


Fig. 5. Organigramme de la FMMEA [5]

La méthode DMEA présente d'autres limitations pour son application dans ce projet. Le besoin scientifique est de déterminer, autre que les composants défaillants, les mécanismes physiques d'endommagement derrière modes de défaillance. Cependant les retours d'expérience disponibles se limitent aux dégradations des composants (exemple : poussoir usé) et aux pannes rencontrées. Les informations que fournissent les retours d'expérience restent génériques et ne permettent pas de répondre au besoin exprimé

Dans la Fig. 6, un exemple de défaillance repérée dans les fichiers de Déposes : Poussoir du solénoïde usé. Le niveau de granularité disponible dans le retour d'expérience est assez grossier. La défaillance « poussoir usé » peut être associée à plusieurs facteurs influents et mécanismes de défaillance :

- Fatigue thermomécanique causée par la dilatation différentielle (cycle thermique variable)
- Fretting du poussoir, vibration
- Matage du poussoir exprimé par une hausse du champ magnétique...etc.

Le but est de déterminer quel facteur a conduit à cette panne. Comme présenté, l'usure du poussoir présente une probabilité d'occurrence faible dans la vanne évaluée à 2, c.-à-d. cette panne présente une faible probabilité d'occurrence par rapport aux autres défaillances des différents composants. Par contre, nous nous intéressons à l'échelle du sous-système traité (solénoïde dans cet exemple). Une transition d'échelle devrait être envisagée.

Une détermination de la probabilité d'occurrence de chaque mécanismes d'endommagement au niveau du sous-système et au niveau du système global est cruciale afin de pouvoir déterminer à l'échelle du sous-système les facteurs sollicitant et les mécanismes d'endommagement les plus prépondérants.

Pour récapituler, les principales limites de la DFMEA rencontrées lors de son application industrielle dans le cadre de cette thèse sont :

- Applicable en phase de conception
- Niveau grossier d'information dans le REX (se limiter seulement aux pannes des composants)
- Manque de données disponibles dans le REX (nouveau programme d'avion)
- Cotation des occurrences par rapport à la vanne (système global)
- Les mécanismes d'endommagement et les sollicitations ne sont pas pris en compte
- Les avis des experts ne sont pas présents dans la pondération des pannes

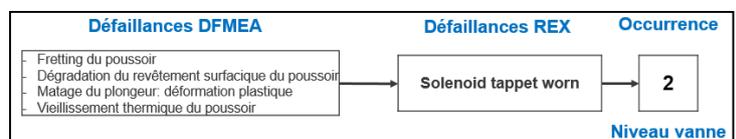


Fig. 6. Niveau de détails présent dans le retour d'expérience disponible

Quant à la FMMEA, elle ne permet pas de traiter exhaustivement, contrairement à la DFMEA, toutes les pannes potentielles. Ceci est dû essentiellement, par définition, à la prise en considération seulement des retours d'expérience pour déterminer les défaillances. Elle ne s'applique qu'en phase d'exploitation. Cette approche ne permettra pas dans notre cas d'investiguer toutes les défaillances potentielles en fonction des facteurs influents pour une raison simple : Une défaillance avec une probabilité de détection faible (inexistante dans le REX) risque de ne pas apparaître dans l'analyse FMMEA car aucun moyen de détection n'est envisagé dans la procédure de suivi. En plus, la FMMEA ne permet pas de prendre en considération les avis des experts.

V. DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE D'IDENTIFICATION DES FACTEURS INFLUENTS « DESIGN FAILURE MODE EFFECT ANALYSIS AND STRESS INVESTIGATION »

L'une des limites les plus contraignantes de l'approche DFMEA standard est qu'elle n'identifie ni les mécanismes de défaillance ni les sollicitations (opérationnelles, environnementales...etc.) subies par le système/composant étudié. Ces derniers sont importants pour planifier les essais accélérés pour maîtriser l'aggravation des sollicitations prépondérantes tout en gardant les mêmes mécanismes de défaillances. Cependant, la FMMEA, applicable qu'en phase opérationnelle du produit, ne permet pas, telle que présentée, de répondre à tous les verrous scientifiques et industriels introduits lors de ce projet car seulement les pannes détectées seront prises en considération.

Pour répondre à cette problématique et éviter les limites des deux méthodes DFMEA et FMMEA, la méthode développée, vue comme une extension des méthodes existantes et centrée sur l'identification des mécanismes d'endommagement et des sollicitations prépondérants sur l'ensemble des composants même en l'absence de données opérationnelles de retour d'expérience. La proposition permet un calcul intermédiaire de la probabilité d'occurrence pour chaque défaillance en estimant les effets d'intégration système et ainsi les dépendances mutuelles de chacun des composants. Le couplage avec des modèles numériques d'endommagement permet de compenser l'absence de données de pannes sans retour d'expérience faute de moyens de détection dédiés. La DFMEA-SI permet de :

- traiter exhaustivement toutes les pannes potentielles (avantage DFMEA)
- Introduire les mécanismes d'endommagement et les facteurs influents (avantage FMMEA)
- Utiliser les retours d'expérience pour déterminer le RPN afin de classer les mécanismes d'endommagement prépondérants (avantage FMMEA)

A. Axes d'amélioration

La prise en considération des rapports d'expertise, les avis des experts et la méthode de calcul de la probabilité d'occurrence constituent les principaux axes d'amélioration. Ces derniers donneront plus d'efficacité à la maîtrise des mécanismes d'endommagement et leurs associations à chaque panne et à chaque composant.

a) Calcul de la probabilité d'occurrence :

Dans la DFMEA et la FMMEA, le calcul de la probabilité se fait uniquement à un niveau bien déterminé. Dans notre cas une transition de niveau est cruciale : Système ↔ Sous-système ↔ composant ↔ mécanisme d'endommagement. Une probabilité d'occurrence par niveau est plus représentative. Cette approche est présentée dans la Fig. 7.

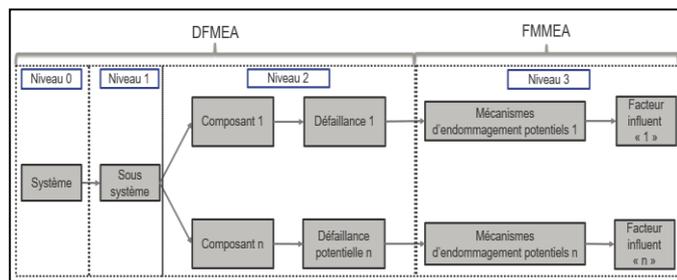


Fig. 8. Transition d'échelle pour la nouvelle méthodologie proposée

Dans la Fig. 7, une transition d'échelle est proposée entre :

- le système (niveau 0),
- le sous-système (niveau 1),
- le composant (niveau 2) et
- les mécanismes d'endommagement et les facteurs influents (niveau 3),

Le calcul de la probabilité d'occurrence globale, illustré par la Fig. 8, sous-entend le calcul de la probabilité d'occurrence d'un mécanisme d'endommagement dans le système.

Par exemple quelle sera la probabilité d'occurrence de la fatigue thermomécanique de la résine d'époxy dans la vanne ?

Pour pouvoir calculer cette probabilité, on est conduit à calculer la probabilité d'occurrence du mécanisme dans l'ensemble des mécanismes de défaillance du composant ensuite celle de la défaillance du composant dans l'ensemble des pannes du sous-système et enfin celle de la défaillance du sous-système dans l'ensemble des pannes du système. Cette probabilité d'occurrence n'est que la multiplication des trois probabilités d'occurrence intermédiaires.

Trois probabilités d'occurrence intermédiaires se présentent :

- α : occurrence du mécanisme d'endommagement dans le composant
- β : occurrence de la défaillance du composant dans le sous-système
- τ : occurrence de la défaillance du sous-système dans le système

Les informations disponibles dans les retours d'expérience sont assez génériques. Pour remédier à cette limite, des rapports d'expertise en étaient développés. Ces rapports représentent des analyses mécaniques réalisées sur les pannes

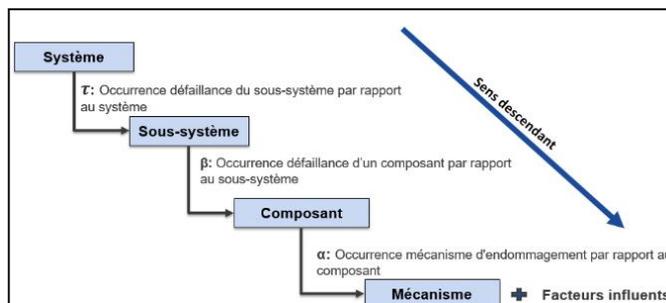


Fig. 7. Description du calcul de la probabilité d'occurrence par niveau

occurentes, graves et non maîtrisées vues par les composants afin de déterminer les mécanismes d'endommagement responsables.

Une analyse exhaustive des rapports d'expertise permettra de déterminer la probabilité d'occurrence α .

Les probabilités β et τ sont calculées à partir des retours d'expérience car le niveau de granularité disponible dans le REX correspond à ces deux niveaux d'échelle d'étude d'occurrence.

Une échelle bien spécifique a été développée pour permettre de transformer la probabilité d'occurrence à une grandeur qui a un sens aux concepteurs. Cette échelle est détaillée dans le tableau 1 :

TABEAU 1 ECHELLE DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE

Probabilité d'occurrence	Echelle
0% - 12%	1
12% - 24%	2
24% - 36%	3
36% - 48%	4
48% - 60%	5
60% - 72%	6
72% - 84%	7
84% - 96%	8
96% - 100%	9

Cette échelle accentue l'importance des mécanismes d'endommagement avec des probabilités d'occurrence supérieure à 96%. La description de l'échelle est illustrée dans le tableau 2 :

TABEAU 2 DESCRIPTION DE L'ECHELLE

Description	Echelle
Des défaillances se produisent régulièrement en service / Les défaillances sont inévitables avec un nouveau design, nouvelle application ou changement de conditions opérationnelles ou environnementales.	9
Défaillances répétées constatées en service / Les défaillances sont fortement probables avec un nouveau design, nouvelle application ou changement de conditions opérationnelles ou environnementales.	8
Nombre élevé de défaillances constatées en service / Les défaillances sont incertaines avec un nouveau design, nouvelle application ou changement de conditions opérationnelles ou environnementales.	7
Défaillances sont constatées par intermittence avec des designs identiques ou similaires en service ou lors des simulations numériques/tests.	6
Défaillances occasionnelles avec des designs identiques ou similaires en service ou lors des simulations numériques/tests.	5
Défaillances isolées avec des designs identiques ou similaires en service ou lors des simulations numériques/tests.	4

Description	Echelle
Peu de défaillances constatées avec des designs identiques ou similaires en service ou lors des simulations numériques/tests.	3
Les défaillances sont rares et très espacées dans le temps avec des designs identiques ou similaires en service ou lors des simulations numériques/tests.	2
Les défaillances quasiment inexistantes avec des designs identiques ou similaires en service ou lors des simulations numériques/tests.	1

Les probabilités de sévérité, d'occurrence et de détection sont calculées par rapport au système global. Dans la nouvelle méthodologie proposée, on fixe la probabilité de détection afin de ne pas biaiser les mécanismes d'endommagement qui présentent des probabilités d'occurrence et de sévérité très élevées mais qui ne sont pas détectables par manque de moyens.

b) Manque de données et avis d'expert :

i. MATRICE DE SIMILARITE

Dans le cas où les données des retours d'expérience et des rapports d'expertise ne sont pas suffisants (cas d'un produit neuf), une analyse de similarité permet d'extrapoler les informations disponibles des autres produits similaires de point de vue technologique (conception et sollicitations) au nouveau produit étudié.

La détermination de la matrice de similarité, entre les sous-systèmes existants et celui étudié, consiste à définir les similarités existantes au niveau de (des):

- la conception
- conditions opérationnelles
- conditions environnementales

Une échelle mettant en évidence le degré de similarité (DS) a été proposée :

- 1 : identique
- 0.5 : similaire
- 0 : différent

On évalue pour chaque élément de la matrice de similarité son influence sur la fiabilité du sous-système (IF) suivant l'échelle suivante :

- 3 : impact important sur la fiabilité
- 2 : impact moyen sur la fiabilité
- 1 : impact faible sur la fiabilité

Dans le tableau 3 sont présentés les éléments de comparaison :

TABEAU 3 ELEMENTS DE LA MATRICE DE SIMILARITE

Paramètres	Degré de similarité	Impact sur la fiabilité
Groupe A. Conception	-	-
1. Fonction	-	-
2. Spécifications	-	-
3. Composants	-	-
4. Structure	-	-
5. Matériaux	-	-
6. Fournisseurs	-	-
7. Assemblage	-	-
Groupe B. Conditions opérationnelles	-	-
8. Duty Cycle	-	-
9. Voltage	-	-

10. Puissance	-	-
11. Pression	-	-
12. Chargement mécanique	-	-
Groupe C. Conditions environnementales	-	-
13. Température	-	-
14. Vibration	-	-
15. Humidité	-	-
16. Moisissure	-	-
17. Pollution	-	-
18. Givrage	-	-
19. Altitude	-	-

Le facteur de similarité (SF) est la somme des facteurs de similarité intermédiaires pour chaque groupe d'élément de comparaison dans (1) :

$$SF = SF_1 + SF_2 + SF_3 \quad (1)$$

Tel que :

SF_1 : facteur de similarité de conception

SF_2 : facteur de similarité des conditions opérationnelles

SF_3 : facteur de similarité des conditions environnementales

Soit N le nombre d'élément de comparaison pour chaque groupement et N_{tot} le nombre de tous les éléments de comparaison pour les 3 groupements ; le calcul des SF_i est fait en respectant la formule suivante (2):

$$SF_i = \sum_{j=1}^N \left[DS_m \times \left[\frac{IF_m}{\sum_{k=1}^{N_{tot}} IF_k} \right] \right] \quad (2)$$

Si $SF > 1$: les conditions environnementales et opérationnelles et la conception présentent une similarité élevée entre le sous-système étudié et celui existant.

Si $SF < 1$: Une similarité faible est présentée entre les sous-systèmes.

ii. PONDERATION DES AVIS DES EXPERTS

Une pondération des probabilités d'occurrence basée sur les avis des experts est aussi proposée dans le cadre de cette nouvelle méthodologie afin d'accentuer certains mécanismes que les REX ne permettent pas de les mettre en évidence par manque de moyens de détection.

Un coefficient de pondération θ_{expert} est défini sur l'intervalle réel [1,2]. L'attribution de ce coefficient est justifiée par la limitation des moyens de détection et la présence du mécanisme en question comme une source secondaire de défaillance dans les fichiers de déposes. L'occurrence est ainsi calculée par (3):

$$Occurrence = \theta_{expert} \times \alpha \times \beta \times \tau \quad (3)$$

c) RPN réduit:

Le numéro de priorité de risque (RPN) est obtenu par la multiplication des trois valeurs représentatives de la probabilité d'occurrence, de détection et de sévérité. Pour le remettre à l'échelle 1-9, une transformation linéaire est envisageable selon (4):

$$RPN_{réduit,i} = Arrondi \left(\frac{9 \times RPN_i}{RPN_{max}} \right) + 1 \quad (4)$$

d) Processus de validation :

L'originalité de cette méthode repose sur une caractérisation bidirectionnelle (deux sens d'analyse) de la classification des mécanismes d'endommagement. La méthodologie de validation est ainsi un développement dans les deux sens (ascendant et descendant) de la DFMEA-SI comme le montre la Fig. 9.

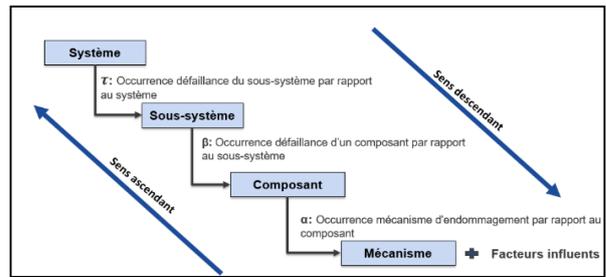


Fig. 9. Analyse DFMEA-SI bidirectionnelle

Contrairement à l'analyse descendante, on part exhaustivement de toutes les sollicitations appliquées et on remonte jusqu'aux composants dans le sens ascendant de la DFMEA-SI. Une analyse par facteur influent doit être menée sur les rapports d'expertise autre que celle développée précédemment pour le calcul de la probabilité d'occurrence intermédiaire α .

La comparaison des mécanismes de défaillance dominants qui ressortent des deux analyses DFMEA-SI permettra de valider les résultats.

Dans le cas d'une différence remarquable entre les résultats bidirectionnels, une vérification des coefficients de pondération et de similarité doit être refaite.

B. Méthodologie générale de la DFMEA-SI

a) Etape 1 : Analyse fonctionnelle:

Comme pour la DFMEA standard, la première étape dans l'élaboration de la DFMEA-SI est le développement de l'analyse fonctionnelle.

Une délimitation du périmètre d'étude permettra d'isoler les causes des défaillances dues au système analysé.

Une détermination des fonctions principales et de contrainte du système et l'affectation des requis servira, outre le développement de la DFMEA, à la détermination des requis non définis à travers la « cross-over matrix » de la Fig. 10.

Dans cette matrice d'analyse, on spécifie à chaque fonction les composants et les spécifications fonctionnelles qui l'assurent.

b) Etape 2 : Analyse des défaillances et des profils de mission

Une analyse préliminaire des sollicitations auxquelles est soumis le sous-système étudié, doit être développée afin de déterminer la cartographie exhaustive des facteurs influents.

Dans un deuxième temps, une étude des retours d'expérience disponibles est essentielle afin de déterminer les deux probabilités d'occurrence intermédiaire :

- β : occurrence de la défaillance du composant dans le sous-système
- τ : occurrence de la défaillance du sous-système dans le système

Si les données disponibles pour le système étudié ne sont pas suffisantes, une extrapolation de l'analyse aux données des produits similaires technologiquement afin de couvrir le plus possible de défaillances. Cette extrapolation se base sur le développement de la matrice de similarité.

Sollicitations	Requis	Interfaces	Référence du requis	Fonctions
TEMPERATURE	Température maximale	→	[REQ-xxxx-AA-0001]	FP1
	Température extrême			
	Profil de vol thermique			
Cycle de vie	Le composant ne fonctionne que pendant les deux dernières phases du vol	→	[REQ-xxxx-AB-0001]	FC4
	Nombre de cycle de fonctionnement			
Effort composant	Course maximale	→	[REQ-xxxx-AC-0001]	FP1 / FC3
	Effort du ressort			
	Effort de la pression			
	Temps pour atteindre la course maximale			

Fig. 10. Cross-over matrix

La détermination de la probabilité d'occurrence α (occurrence du mécanisme d'endommagement dans le composant) est l'étape la plus délicate car ça nécessite d'une part, une maîtrise des mécanismes d'endommagement provoqués par la cartographie des sollicitations et d'autre part l'analyse de tous les rapports d'expertise qui permettent d'isoler physiquement la défaillance afin d'investiguer le mécanisme présent. A chaque composant (ou groupement fonctionnel) on attribue les mécanismes d'endommagement potentiels avec une probabilité d'occurrence. Dans le cas de manque de données pour certains mécanismes qui touchent un seul composant, on suppose qu'ils sont équiprobables sauf pondération d'expert.

c) *Etape 3 : Développement la DFMEA-SI (à sens descendant)*

Une fois que les probabilités d'occurrence intermédiaires, les mécanismes d'endommagement et les sollicitations appliquées sont déterminés, le développement de la DFMEA-SI est possible. On fixe la probabilité de détection pour toutes les défaillances et on détermine la probabilité de sévérité selon l'impact que génère la défaillance sur le fonctionnement du système global. Le calcul du RPN se fait par la multiplication des probabilités de sévérité et d'occurrence.

Pour conclure la DFMEA-SI, une réduction du RPN calculé (suivant l'équation (2)) permettra de déterminer les mécanismes d'endommagement et les sollicitations les plus prépondérants (ceux qui ont le $RPN_{réduit}$ le plus élevé).

Dans la Fig. 11, on présente la structure de la DFMEA-SI sens descendant.

composant	% occurrence défaillance du composant dans le solénoïde	Stress	Mécanisme potentiel d'endommagement	% occurrence du mécanisme par rapport défaillance par composant	Pannes REX solénoïde	
% Occurrence vanne	Taux de défaillance REX	occurrence équivalente	Impact Vanne	Gravité	RPN réduit	RPN équivalent

Fig. 11. Structure de la DFMEA-SI sens descendant

d) *Etape 4 : Développement la DFMEA-SI (à sens ascendant)*

L'originalité de cette étape est qu'on réalise l'analyse partir de la cartographie des sollicitations et on remonte aux composants impactés.

L'analyse des rapports d'expertise se fait, contrairement à l'analyse précédente, par facteurs influents.

La probabilité d'occurrence α représente l'occurrence du facteur analysé dans la génération des défaillances du composant. La probabilité β désigne l'occurrence de la défaillance du composant dans le sous-système et générée par le facteur étudié. La probabilité τ , à son tour, est la probabilité d'occurrence de la défaillance du sous-système générée par la sollicitation étudiée dans le système global.

Les probabilités de détection et de sévérité sont maintenues constantes pareil à l'analyse descendante.

Le calcul du $RPN_{réduit, facteur}$ permet d'investiguer les sollicitations prépondérantes et les mécanismes d'endommagement qui en découlent.

Dans la Fig. 12, on présente la structure de la DFMEA-SI à sens ascendant.

Stress	% par rapport défaillances	α	composant	mécanismes	β	Impact sur sous-système
τ	Occurrence globale	Impact sur système	Gravité	Détection	RPN réduit	RPN < 10

Fig. 12. Structure de la DFMEA-SI sens ascendant

e) *Etape 5 : Croisement des deux analyses (ascendante / descendante)*

Une comparaison des ressortissants des deux analyses permet de valider les mécanismes et les sollicitations les plus dominants. Dans le cas d'une différence remarquable entre les résultats bidirectionnels, une vérification des coefficients de pondération et de la similarité doit être faite.

VI. APPLICATION DE LA DFMEA-SI SUR LE SOLENOÏDE DE LA VANNE DE PRELEVEMENT D'AIR

A. Périmètre d'étude

La première fonction du système de prélèvement d'air du moteur est de sélectionner de manière optimale la prise d'air adéquate sur le moteur. La deuxième fonction du prélèvement d'air est d'abaisser la pression et la température de l'air prélevé, à des niveaux acceptables pour les conduites placées en aval et pour le système de refroidissement de l'air. Ceci est réalisé par deux composants principaux :

- la vanne de régulation de pression; cette vanne le plus souvent de type "papillon" module le débit d'air de façon à ce que le flux d'air en aval ait une pression plus faible et constante.
- le pré-refroidisseur ; cet échangeur de chaleur est alimenté sur l'un de ses côtés par de l'air chaud venu du compresseur comme décrit ci-dessus dans la Fig. 13. et sur l'autre côté par de l'air froid prélevé sur le canal d'air de FAN.

Deux prises de pression sont installées sur deux étages du compresseur permettant ainsi de prélever de l'air sur le moteur en fonction des différentes phases du vol de l'avion. Lorsque le moteur fonctionne à bas régime, l'air est prélevé par la « High Pressure Valve » (HPV) afin d'avoir assez de pression et lorsque le moteur tourne à un régime plus élevé, l'air est pris par la « Intermediate Pressure Valve » (IPV) pour ne pas dégrader la puissance du moteur (en croisière notamment). L'architecture du système d'air est présentée dans la Fig. 13.

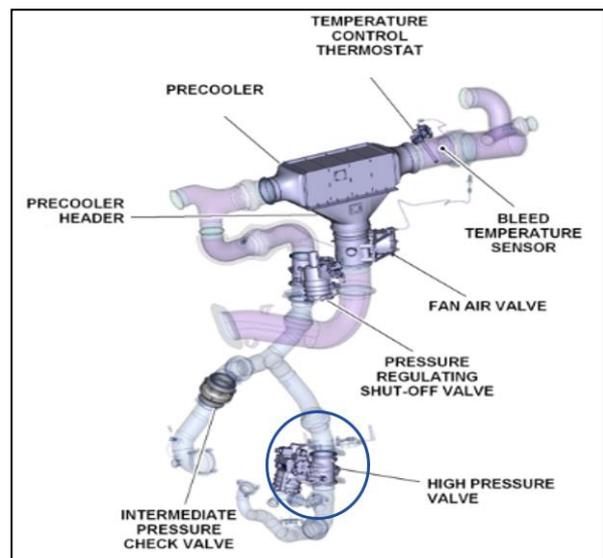


Fig. 13. Architecture du système de prélèvement d'air

Dans cette étude, on s'intéresse à la vanne de prélèvement HPV. Le choix de cette vanne est justifié par le fait que cette dernière est connectée au port le plus énergétique du moteur.

Ainsi, elle subit des sollicitations plus sévères par rapport aux autres vannes.

Les principales sollicitations appliquées sur les composants des vannes peuvent être classées selon trois catégories :

- Sollicitations liées au profil de mission : Durée de vol (FH), Durée de stockage de l'équipement, le Duty cycle...
- Sollicitations opérationnelles : Nombre de cycles ON/OFF, pression, puissance électrique
- Sollicitations environnementales : Température, Humidité, vibration, ...

Une analyse fonctionnelle de la vanne HPV permettra de comprendre son fonctionnement et la détermination des principaux composants défaillants. La subdivision des composants de la vanne HPV en groupement fonctionnel est illustrée dans la Fig. 14.

En analysant les données de retour d'expérience et les fichiers de dépose (REX), on se rend compte que malgré leurs taux de défaillance légèrement faibles par rapport à ceux des autres sous-systèmes constituant la vanne HPV, le solénoïde et la membrane du régulateur de pression présentent des phénomènes de dégradation fortement liés à la variation imprévisible des sollicitations environnementaux et opérationnelles.

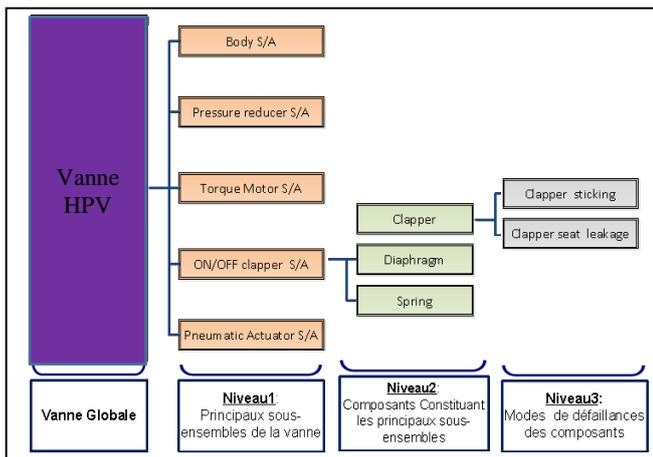


Fig. 14. Subdivision des composants de la vanne

Les pannes induites dans le reste des sous-systèmes sont dues essentiellement à des phénomènes d'usure conventionnels (roulements, segments...etc. défectueux). Les fluctuations de sollicitations thermiques vues par le solénoïde et la membrane de régulation de pression sont dues :

- A la variation du flux de refroidissement conçue pour « souffler » directement sur ces deux composants. Ce jet d'air « froid » (prélevé de l'air du fan) est assuré par le motoriste.
- Le flux thermique reçu à travers la conduction (contact avec le corps de vanne), la convection à travers l'air chaud qui traverse la vanne et le rayonnement (partie chaude du moteur). Ce flux de chaleur dépend fortement des différentes phases de vol.

La Fig. 15 décrit la répartition des pannes du solénoïde de l'avion commercial 4 entre 2016 et 2019.

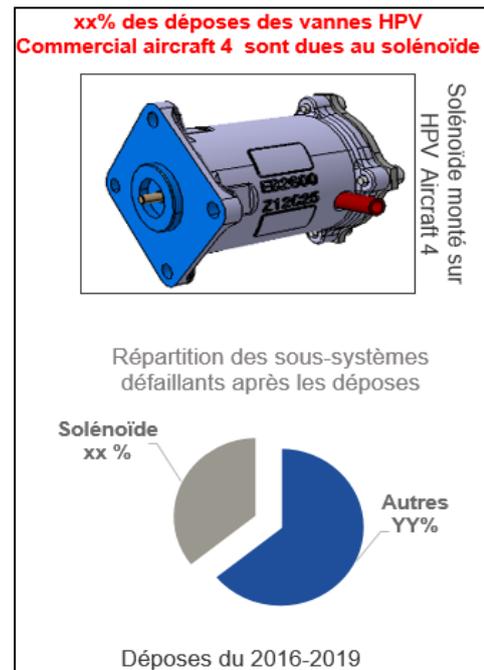


Fig. 15. Répartition des pannes de la vanne HPV pour le Commercial Aircraft 4

Pour une raison de confidentialité, plusieurs données seront tronquées. La fonction de l'électroaimant est d'obtenir ou d'ouvrir une section de passage d'air dans la chambre d'ouverture de l'actionneur pneumatique. Le noyau magnétique (le plongeur) se caractérise par un fonctionnement tout ou rien. Le plongeur subit la force magnétique générée par le champ magnétique de la bobine. Il en découle une action mécanique linéaire qui actionne le poussoir. La course maximale du solénoïde est de 1,1 mm.

Les principaux composants du solénoïde sont :

- Un corps en matériau 1
- Une bobine électrique imprégnée et encapsulée
- Un poussoir en matériau 2
- Un noyau plongeur magnétique en matériau 3
- Un ressort de rappel
- Autres composants (guidage en translation, joints d'étanchéité et d'entrefer).

B. Développement la DFMEA-SI pour le solénoïde :

Les composants du solénoïde, dans la Fig. 16, sont classés suivant deux familles :

- La partie électrique constituée essentiellement de la bobine.
- La partie mécanique.

Une analyse fonctionnelle détaillée a été développée et validée par une matrice de cross-over afin d'affecter à chaque fonction les requis de fonctionnement comme le montre le tableau 4 pour la fonction principale1 (les niveaux renseignés sont erronés pour une question de confidentialité).

TABLEAU 4 MATRICE DE CROSS-OVER POUR LA FONCTION PRINCIPALE 1

	Conditions / Criterion	Levels	Requis
FP1: to push the On / Off clapper after electrical excitation	Operational stroke	0.5mm (+/-)	Req 123
	Pull-in time	<100 ms	Req 124
	Pull-in current	< 5 mA	Req 125
	Holding current	>2mA	Req 126
	Electrical power range	V=[1V, 2V]; R	Req 127
	Ambiant conditions (T_amb, P_amb)	T_amb = 100°C, P_amb= 1bar	Req 128
Load to overpass	spring effort	Req 129	

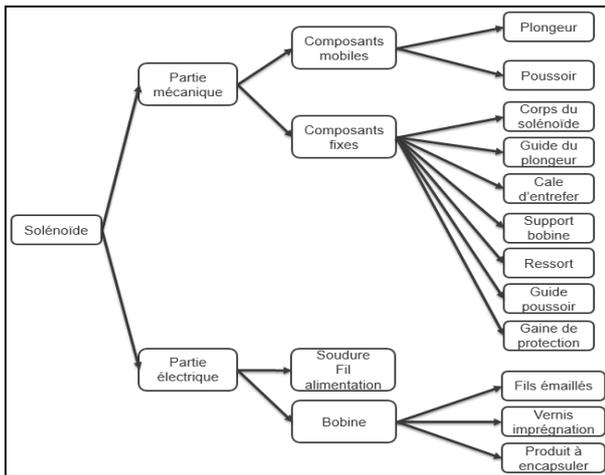


Fig. 16. Composition du solénoïde

La spécification de tous les requis des fonctions permet de cibler les causes majeurs des défaillances : non-respect des exigences des fonctions. Une liste exhaustive des différentes causes potentielles a été développée. Cette liste est triée grâce à l'analyse détaillée des retours d'expérience et des rapports d'expertise.

Le solénoïde traité est spécifique à un nouveau programme d'avion ne disposant pas assez de données d'expérience. Il a été développé dans l'optique de diminuer le nombre de sous-ensemble par rapport à l'ancien solénoïde et donc le coût, tout en conservant des performances dynamiques et statiques équivalente à l'ancienne technologie. Ainsi on déduit la similarité importante entre les deux technologies ou seulement les conditions d'utilisation qui diffèrent (duty cycle, conditions environnementales...etc.) Ceci nous permet de nous servir des retours d'expérience des autres programmes pour le développement de la DFMEA-SI du solénoïde actuel. On dispose de N Déposes de solénoïde, réparties comme suit dans le tableau 5.

Les composants du solénoïde sont classés par des groupements fonctionnels pour cerner les origines des défaillances.

- 1- Sous-système: Bobine
- 2- Sous-système: Plongeur : Guide en translation + cale d'entrefer + joint d'étanchéité + plongeur
- 3- Sous-système: Pousoir : Ressort de rappel + guide en translation
- 4- Brasure
- 5- Sous-système: Corps : Corps + support bobine

Pour chaque composant et groupement fonctionnel, on analyse les rapports d'expertise pour attribuer les probabilités

TABLEAU 5 REPARTITION DES DEFAILLANCES DES COMPOSANTS DU SOLENOÏDE

	Composants	β = % défaillance dans le solénoïde	Justification
1	Bobine	xx%	Par similitude : - Bobine - Plongeur - Pousoir - Brasures - Corps
2	Groupement Plongeur	yy%	
3	Groupement Pousoir	zz%	
4	Brasure	kk%	
5	Corps	mm%	

d'occurrences intermédiaires adéquates à chaque mécanisme d'endommagement de la DFMEA-SI. 78 rapports d'expertise ont été repérés. Le tableau de la figure suivante (Fig. 18) illustre la probabilité d'occurrence des mécanismes d'endommagement du plongeur par rapport aux défaillances du même composant (probabilité d'occurrence intermédiaire α)

Produit à encapsuler	Mécanisme d'endommagement 1	80%	Cyclage thermique
	Mécanisme d'endommagement 2	10%	Cyclage thermique
	Mécanisme d'endommagement 3	4%	humidité
	Mécanisme d'endommagement 4	6%	sollicitations vibratoires

Fig. 17. Mécanismes d'endommagement et facteurs influents

Dans le cas de la Fig. 19, la bobine est constituée des fils émaillés, du vernis d'imprégnation et du produit à encapsuler. L'occurrence β est considérée iso-probable pour tous les composants à cause du niveau de granularité grossier trouvé dans le REX.

La détermination des différentes probabilités d'occurrence intermédiaires pour chaque mécanisme d'endommagement (α) et composant (β) et du sous-système (τ) permet de coter et trier les causes majeures des défaillances du solénoïde. Après le calcul du RPN réduit, on déduit à travers la DFMEA-SI sens descendant que les mécanismes d'endommagement prépondérants sont essentiellement :

- La fatigue thermomécanique du fil de la bobine noyé dans la résine d'époxy qui encapsule la bobine à cause de la dilatation thermique différentielle (différents coefficients de dilatation thermique des matériaux).
- L'arrachement des émaux des fils de la bobine à cause de la dilatation différentielle entre les composants de la bobine.

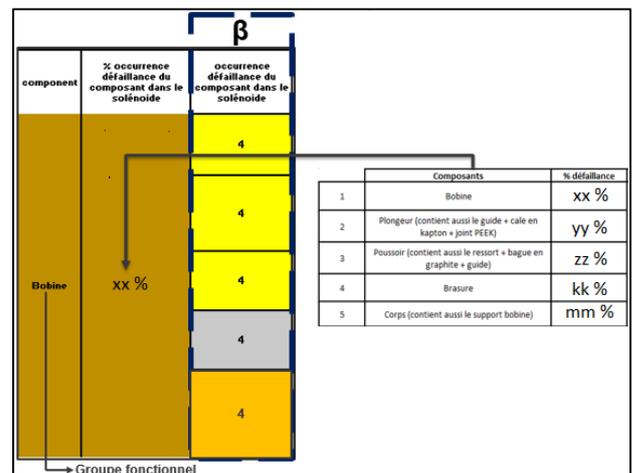


Fig. 18. Calcul de la probabilité d'occurrence β

Les stress qui ressortent sont :

- Le cyclage thermique : fréquence, température maximale et gradient de température,
- Le cyclage électrique : fréquence, amplitude maximale.

De la même manière, on développe le sens ascendant de la DFMEA. On part des différentes sollicitations et on remonte jusqu'aux composants et leurs impacts sur le fonctionnement de la vanne de prélèvement d'air.

Un autre mécanisme de défaillance apparaît prépondérant correspondant au fretting du plongeur sous l'effet de la vibration. Ceci se manifeste par identifier rigoureusement un RPN inférieur à celui des autres mécanismes cités avant.

La comparaison entre les résultats des deux sens de la DFMEA-SI, nous conduit à conclure sur les mécanismes de défaillance dominants et les sollicitations influentes qui les génèrent.

VII. CONCLUSION

La nouvelle méthodologie proposée permet de combiner les avantages de la DFMEA standard et de la FMMEA. Une classification avancée des mécanismes d'endommagement et des sollicitations prépondérantes est faite en se basant sur une décomposition par niveau de la probabilité d'occurrence. Cette méthode impose une valeur constante de la probabilité de détection pour ne pas biaiser les défaillances sans moyen de détection adéquat. L'originalité de l'approche est dans la bidirectionnalité de l'analyse, à savoir une analyse descendante de décomposition du système vers des

mécanismes de défaillance et remontante depuis le mécanisme de défaillance vers le système pour en identifier notamment les effets sur les paramètres fonctionnels.

Une détermination préliminaire des mécanismes d'endommagement induisant la défaillance du solénoïde a été présentée comme cas d'application de la DFMEA-SI. Pour pouvoir développer les essais accélérés d'une façon fiable, une caractérisation expérimentale et numérique des niveaux de sollicitation doit être menée afin de quantifier les intervalles de sollicitations qui conservent les mêmes mécanismes de défaillance vus par le sous-système durant son cycle de vie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] documents internes "confidential"
- [2] Scanff E, Feldman KL, Ghelam S, Sandborn P, Glade M, Foucher B. Life cycle cost impact of using prognostic health management (PHM) for helicopter avionics. *Microelectron Reliab* 2007;47(12):1857-64.
- [3] Cassanelli G, Mura G, Fantini F, Vanzi M, Plano B. Failure analysis assisted FMEA. *Microelectron Reliab* 2006;46(9-11):1795-9.
- [4] Sachin Kumar, Eli Dolev, Michael Pecht, « Parameter selection for health monitoring of electronic products », *Microelectronics Reliability* volume 50, issue 2, February 2010, page 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2009.09.016>
- [5] M. Catelani, L. Ciani*, M. Venzi, Failure modes, mechanisms and effect analysis on temperature redundant sensor stage, Department of Information Engineering (DINFO), University of Florence, Via S. Marta 3, Florence 50139, Italy
- [6] M. Pecht, *Prognostics and Health Management of Electronics*, Wiley Interscience, New York, August 2008.
- [7] M. Pecht, A. Dasgupta, Physics-of-Failure: An approach to reliable Product Development. *Journal of the Institute of Environmental Sciences*, Vol.38, pp.30-34. Septembre 1995