



**HAL**  
open science

# Développement d'une méthode commune de diagnostic et pronostic basée sur un cadre formel de modélisation générique. Application à un module électro-hydrostatique aéronautique

Garance Vinson

## ► To cite this version:

Garance Vinson. Développement d'une méthode commune de diagnostic et pronostic basée sur un cadre formel de modélisation générique. Application à un module électro-hydrostatique aéronautique. Automatique. Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2014. Français. NNT : . tel-02143697

**HAL Id: tel-02143697**

**<https://laas.hal.science/tel-02143697v1>**

Submitted on 29 May 2019

**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.



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

---

**Présentée et soutenue par :**

**Garance VINSON**

**le** 21 Février 2014

**Titre :**

Développement d'une méthode commune de diagnostic et pronostic basée  
sur un cadre formel de modélisation générique.

Application à un module électro-hydrostatique aéronautique.

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

EDSYS : Automatique 4200046

**Unité de recherche :**

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

**Directeur(s) de Thèse :**

M. Michel COMBACAU et M. Jean-Charles MARE

**Jury :**

M. Vincent COCQUEMPOT - Président du jury et rapporteur

M. Grigor GOGU - Rapporteur

M. Raphaël GOURIVEAU - Examineur

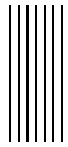
Mme Pauline RIBOT - Examinatrice

M. Michel COMBACAU et M. Jean-Charles MARE - Co-directeurs









# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Le suivi de l'état de santé : contexte et méthodes</b>	<b>3</b>
1.1 Définitions et vocabulaire sur la vie et le vieillissement des équipements . . . . .	4
1.2 Les enjeux du Health Monitoring dans l'industrie aéronautique . . . . .	5
1.2.1 Vers l'avion plus électrique . . . . .	6
1.2.2 Le développement d'un EHA pour les commandes de vol . . . . .	8
1.2.3 Le Health-Monitoring pour optimiser les coûts de maintenance . . . . .	9
1.2.4 Conclusion . . . . .	10
1.3 Le diagnostic . . . . .	11
1.3.1 Définition . . . . .	11
1.3.2 Les méthodes de diagnostic . . . . .	12
1.3.3 Conclusion . . . . .	17
1.4 Le pronostic . . . . .	17
1.4.1 Définition . . . . .	17
1.4.2 Les méthodes de pronostic . . . . .	19
1.4.3 Les lois de vieillissement . . . . .	28
1.4.4 Incertitudes et confiance dans la prédiction . . . . .	34
1.4.5 Conclusion . . . . .	36
<b>2 Mise en place d'un cadre générique de modélisation</b>	<b>39</b>
2.1 Modélisation fonctionnelle et structurelle du système . . . . .	40
2.1.1 Les composants du système et les fonctions élémentaires . . . . .	40
2.1.2 La structure du système, les paramètres et leurs rangs . . . . .	42
2.1.3 Les fonctions objectifs du système . . . . .	43
2.2 Modélisation du vieillissement du système . . . . .	46
2.2.1 Les facteurs d'endommagement . . . . .	46
2.2.2 L'endommagement . . . . .	46
2.2.3 La loi de rétroaction . . . . .	47
2.2.4 Le lien entre le modèle fonctionnel et le modèle de vieillissement . . . . .	48
2.3 Modélisation des pertes de performance du système . . . . .	50
2.3.1 La performance d'une fonction . . . . .	50
2.3.2 La propagation de perte de performance dans le système . . . . .	50
2.3.3 La disponibilité des fonctions et la fin de vie utile . . . . .	52
2.3.4 Le lien entre le modèle de vieillissement et le modèle de performance . . . . .	54
2.4 Modèle complet du système sur trois niveaux . . . . .	57
<b>3 Mise en place d'une méthode formelle de suivi de l'état de santé</b>	<b>61</b>
3.1 Modélisation des comportements du système . . . . .	61

---

3.1.1	Les modes des composants . . . . .	61
3.1.2	Les modes du système . . . . .	63
3.1.3	La trajectoire des modes et le suivi de l'état de santé . . . . .	64
3.2	Représentation des modes du système sous forme d'automate . . . . .	64
3.2.1	L'automate des modes des composants . . . . .	64
3.2.2	L'automate des modes du système . . . . .	65
3.2.3	La construction des automates des modes . . . . .	68
3.3	Détermination de l'état de santé du système . . . . .	71
3.3.1	Les définitions basées sur notre cadre générique . . . . .	71
3.3.2	Les algorithmes . . . . .	72
3.4	Concepts liés au diagnostic et au pronostic . . . . .	82
3.4.1	Les métriques de performance du diagnostic et du pronostic . . . . .	82
3.4.2	La qualité des modules de diagnostic et de pronostic . . . . .	85
3.4.3	La diagnosticabilité et la pronosticabilité . . . . .	88
<b>4</b>	<b>Présentation de l'ensemble moto-pompe</b>	<b>93</b>
4.1	Description de l'équipement et de ses modes de défaillance . . . . .	94
4.1.1	Description de la machine électrique . . . . .	94
4.1.2	Description de la pompe hydraulique . . . . .	96
4.1.3	Description des composants environnant l'ensemble moto-pompe . . . . .	100
4.1.4	Analyse des défaillances de l'ensemble moto-pompe . . . . .	100
4.2	Modélisation de l'équipement et mise en forme du modèle . . . . .	104
4.2.1	Modélisation du comportement nominal . . . . .	104
4.2.2	Mise en forme du modèle . . . . .	113
<b>5</b>	<b>Suivi de l'état de santé de l'ensemble moto-pompe</b>	<b>121</b>
5.1	Le suivi de l'état de santé du moteur électrique . . . . .	121
5.1.1	Les courts-circuits entre spires . . . . .	122
5.1.2	La désaimantation partielle du rotor . . . . .	136
5.1.3	Application de la méthode formelle de diagnostic et pronostic . . . . .	144
5.1.4	Conclusion . . . . .	149
5.2	Le suivi de l'état de santé de la pompe hydraulique . . . . .	150
5.2.1	Prototype virtuel . . . . .	150
5.2.2	Caractérisation et modélisation des fautes de la pompe hydraulique . . . . .	152
5.2.3	Les principaux types d'analyse des défauts . . . . .	155
5.2.4	Conclusion et perspectives . . . . .	155
	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>159</b>
	<b>Glossaire</b>	<b>163</b>
<b>6</b>	<b>Annexes</b>	<b>165</b>
6.1	Les lois de vieillissement . . . . .	165
	Les lois de vieillissement . . . . .	165
6.1.1	Les lois de vieillissement statistiques . . . . .	165
6.1.2	Les lois de vieillissement physiques . . . . .	168
6.1.3	Les lois de vieillissement à la fois statistiques et physiques . . . . .	171
6.2	Les essais : une aide à la conception des modèles pour le Health Monitoring . . . . .	176

---

---

Les essais : une aide à la conception des modèles pour le Health Monitoring . . . . .	176
6.2.1 Les essais pour le diagnostic . . . . .	176
6.2.2 Les essais pour le pronostic . . . . .	176
6.3 Liste des paramètres du modèle de l'EHA . . . . .	180
Liste des paramètres du modèle de l'EHA . . . . .	180
6.4 Calcul de la puissance thermique à dissiper en cas de court-circuit statorique . . .	182
Calcul de la puissance thermique à dissiper . . . . .	182
6.5 Les rangs des modes des composants de la MSAP . . . . .	185
Les rangs des modes des composants de la MSAP . . . . .	185
6.6 Définitions de distances . . . . .	187
Définitions de distances . . . . .	187
6.7 Etabli de manipulation de la salle d'essais . . . . .	188
Etabli de manipulation de la salle d'essais . . . . .	188



---

---



# Remerciements

Il est coutume de dire que la thèse n'est pas un travail personnel, que rien ne serait possible sans l'entourage, et je ne peux qu'approuver. Mes remerciements vont ici à de nombreuses personnes.

Je remercie vivement les membres du jury de thèse. Merci beaucoup à Vincent Cocquempot et Grigore Gogu pour leurs rapports, et pour les échanges qui ont suivi leur lecture attentive du manuscrit. Un merci particulier à Vincent Cocquempot pour avoir accepté la présidence du jury de thèse. Merci également à Rafael Gouriveau pour sa lecture et ses commentaires, et pour ses questions intéressantes lors de la soutenance.

J'aimerais remercier très chaleureusement mes directeurs de thèse. Merci Michel pour tes encouragements, ta franchise et ton honnêteté, ton aide tant dans la vue globale et la définition des objectifs que dans les détails, et ta persévérance. Merci Jean-Charles pour la précision et la justesse de tes remarques, et pour ta bonne humeur. Je garderai de bons souvenirs de votre encadrement, c'était chaque fois un plaisir de vous voir et travailler avec vous.

Un grand merci à Pauline Ribot, pour avoir été à l'origine de la motivation académique à lancer ma thèse à la suite de ses travaux thèse, et surtout pour m'avoir suivie " au jour le jour " dès la deuxième année de la thèse. Merci pour ton accompagnement, ta rigueur scientifique, tes encouragements, ton écoute, ta gaieté, et bien sûr les pizzas et les gelato !

Je remercie Hervé Charuel pour m'avoir accueillie dans son service. J'en profite pour remercier Jean-Philippe Vaslin, Patrice Nevoret et Jean-Luc Faillot pour la confiance qu'ils m'ont témoignée durant ma thèse, et au-delà. Un merci tout particulier à mon tuteur industriel Thomas Prado. Merci pour avoir rendu mon intégration dans le monde de l'entreprise aussi facile, pour m'avoir présenté les ficelles du métier, pour m'avoir motivée lorsque j'en avais besoin. En plus de tes compétences scientifiques et techniques j'ai apprécié ta liberté et ton humour.

Je remercie toutes les personnes qui ont rendu ces trois années exceptionnelles, qui m'ont fait grandir, que je suis chanceuse d'avoir croisé ou d'avoir encore dans ma vie.

Au LAAS, l'équipe DISCO est dynamique et pleine de vie, merci à tous. Chez Messier, j'ai croisé une multitude de personnes et personnalités intéressantes, merci à tous. Je ne citerai pas de noms mais chacun a compté.

Ma vie personnelle a été riche durant ces trois années et j'y ai trouvé une grande force pour les épreuves liées à la thèse. Merci à tous mes amis, les filles du cheval, les toulousains, les parigots, les chaburiens, vous vous reconnaissez, vous êtes dans mon coeur.

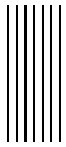
Merci à mes parents qui ont cru en moi et m'ont soutenue depuis le début. Merci à mes frères Théo et Hugo, à ma sœur Léa, et à mon adorable neveu Liam. Merci à tous pour les fous-rires partagés, pour m'avoir souvent permis de recharger les batteries !

---

Merci à mes grand-mères, deux beaux exemples de courage et de ténacité.

J'associe ma belle-famille à ces remerciements pour les bons moments passés ensemble.

Enfin, un merci tout particulier à Guillaume pour sa présence à mes côtés, pour tout ce qu'on partage au quotidien, pour me rendre plus forte.



# Introduction générale

L'industrie aéronautique est un marché en perpétuelle évolution, exigeant et fortement concurrentiel. Il est devenu primordial pour les équipementiers de tenir les enjeux de réduction de coût, de qualité, de fiabilité, de disponibilité opérationnelle et de sûreté de fonctionnement des équipements proposés.

Un des leviers sur lesquels peuvent appuyer les équipementiers pour rendre leurs produits plus attractifs aux yeux des compagnies aériennes est l'optimisation des opérations de maintenance. C'est également dans leur intérêt puisque les coûts de maintenance sont généralement contractuellement garantis par l'équipementier. Il est donc impératif de maîtriser ces coûts dès le départ afin d'assurer la performance économique.

La maintenance entraîne des coûts importants. Ils sont liés, pendant les opérations de maintenance, à la localisation de la panne, à la réparation ou au remplacement de l'équipement, et aux outillages. Pendant la durée de vie de l'avion, ils sont dus à son immobilisation, aux interruptions d'opération, ou aux retards générés par une panne imprévue. Pour avoir une idée des coûts engagés, à l'achat un A340 coûte environ 260 millions de dollars (prix catalogue 2011), auxquels s'ajoutent 60 000 dollars par heure de vol (c'est ce qu'on appelle le coût d'opération). Une heure de retard coûte à la compagnie 12 000 dollars, et il faut compter 100 000 dollars pour un vol annulé.

Pour optimiser l'organisation de la maintenance, une voie de plus en plus explorée par les industriels est le Health-Monitoring. Cette activité consiste à surveiller l'état de santé d'un équipement pour diagnostiquer son état courant et pronostiquer (prédire) son état futur ; c'est donc un outil intéressant pour organiser au mieux la maintenance.

Plus précisément, le diagnostic permet de localiser et d'identifier les fautes sur l'équipement, ce qui permet lors de la phase de maintenance de diminuer la durée d'exploration et de recherche de la faute, car dans l'idéal l'opérateur sait précisément quel est le composant en faute et quelle est la faute. Ainsi, la durée d'immobilisation de l'avion est diminuée.

Le pronostic permet d'anticiper les futures fautes et ainsi de privilégier la maintenance préventive, c'est-à-dire la maintenance réalisée juste avant la faute, moins chère sur le long terme que la maintenance non programmée puisqu'elle permet d'éviter certaines pannes, et donc de diminuer les coûts liés aux retards ou aux interruptions d'opération non prévues.

La recherche sur le diagnostic a été assez poussée ces dernières années et certaines applications ont vu le jour dans l'industrie. En revanche l'intérêt pour le pronostic est plus récent ; les avancées dans ce domaine en sont principalement au stade de la recherche scientifique, il y a encore peu de propositions matures au niveau industriel.

Dans le chapitre 1 nous présentons le contexte industriel des travaux de thèse, puis nous proposons un état de l'art autour du diagnostic et du pronostic. A l'issue de ce chapitre nous remarquons que

---

peu de travaux s'intéressent à l'intégration d'un cadre commun pour le diagnostic et le pronostic. Nous constatons qu'une méthode générique, adaptable pour tous types d'équipements, serait plus cohérente que le développement d'une méthode par équipement.

Ces réflexions nous mènent au chapitre 2, où dans le but de standardiser le diagnostic et le pronostic dans une même méthode formelle de détermination de l'état de santé, nous proposons un cadre de modélisation générique. Ce cadre est composé de deux parties, tout d'abord, un modèle structurel et fonctionnel permet de représenter le comportement nominal ou de faute des systèmes complexes. Ensuite, un modèle de vieillissement permet de représenter la dégradation de l'état de santé du système dans le temps. Ainsi, le modèle synthétise les informations nécessaires à la fois au diagnostic et au pronostic.

Une méthode de suivi de l'état de santé basée sur ce cadre de modélisation est ensuite proposée dans le chapitre 3. L'objectif est de connaître l'état de tout équipement complexe à tout moment de sa vie opérationnelle, tant du point de vue de l'état de santé, c'est-à-dire des endommagements et des fautes possibles, que du point de vue fonctionnel, c'est-à-dire des pertes de performance et des défaillances induites. La méthode s'appuie sur deux modules. Le module de diagnostic évalue l'état de santé courant du système et de ses composants. Le module de pronostic, qui réutilise la méthode de diagnostic, prédit l'état de santé futur du système et de ses composants, et en déduit la nature et les instants d'apparition des futures défaillances.

Le développement du cadre générique de modélisation et de la méthode formelle de Health-Monitoring basée sur ce cadre forment le socle théorique des travaux de thèse. S'agissant d'une thèse CIFRE, ces développements formels ont été réalisés pour être adaptés aux spécificités liées à l'industrie, et notamment à l'industrie aéronautique.

Messier-Bugatti-Dowty (MBD) est un équipementier aéronautique du groupe Safran, fournisseur de tous les principaux avions civils et militaires. Il est le leader mondial des systèmes d'atterrissage et de freinage. Il est à ce titre particulièrement intéressé par le Health-Monitoring et ses gains en termes d'optimisation de la maintenance et d'augmentation de la disponibilité opérationnelle de ses équipements. L'application choisie pour cette étude est le groupe moto-pompe des actionneur électro-hydraulique (EHA), une technologie poussée par MBD pour répondre aux besoins de l'avion plus électrique du futur. Le comportement de l'ensemble moto-pompe est décrit et modélisé dans le chapitre 4, et une analyse de ses défaillances permet de choisir les fautes critiques à surveiller.

Le chapitre 5 présente l'application de la méthode de suivi de l'état de santé au groupe moto-pompe, et particulièrement à ses deux équipements critiques, une machine synchrone à aimants permanents et une pompe hydraulique. Les modes de dégradation du moteur et de la pompe sont étudiés en détails suivant la méthode développée dans le chapitre 2. Les algorithmes présentés dans le chapitre 3 sont appliqués à la machine synchrone à aimants permanents, les deux fautes étudiées étant les courts-circuits entre spires d'une même phase du stator, et la désaimantation partielle du rotor.

**Résumé** : dans ce chapitre, le champ lexical et les définitions nécessaires à la compréhension de la problématique du Health Monitoring sont posés. Le contexte industriel est ensuite présenté, et notamment le cadre des innovations liées à l'avion plus électrique. Les enjeux du Health Monitoring dans l'industrie aéronautique, et plus précisément les gains attendus pour l'optimisation de l'organisation de la maintenance, sont ensuite explicités. Finalement un état de l'art sur le diagnostic et le pronostic est réalisé, ce qui permet de choisir la méthode la plus adaptée au regard de notre application et de nos exigences de généricité de la méthode de Health-Monitoring, à savoir la méthode à base de modèles.

## Introduction

Le Health Monitoring ou suivi de l'état de santé consiste à détecter les problèmes physiques d'un équipement et les comprendre pour agir en conséquence.

On pense immédiatement à la maintenance conditionnelle qui représente le lien entre le suivi de l'état de santé et la maintenance.

**Définition 1** (maintenance conditionnelle). *La maintenance conditionnelle est l'organisation de la maintenance basée sur la connaissance de l'état de l'équipement, grâce à un suivi de l'état de santé. Les opérations de maintenance peuvent être programmées grâce au suivi d'indicateurs pour être réalisées au moment opportun. Ce terme vient de l'anglais Condition-based maintenance (CBM).*

Le suivi de l'état de santé des équipements a plusieurs objectifs :

- assurer la disponibilité opérationnelle (voir définition 2) des équipements et réduire les interruptions d'opération ;
- augmenter la sécurité en prévenant les pannes majeures ;
- réduire les coûts du cycle de vie et notamment :
  - programmer efficacement la maintenance afin de réduire les coûts associés ;
  - réduire le stock nécessaire de pièces de rechange ;
  - maximiser la vie en service, augmenter la durée d'utilisation des équipements en évitant les opérations de maintenance trop précoces ;
  - optimiser la conception en réduisant les marges conduisant au surdimensionnement exagéré des équipements, ce qui permettrait de réduire les coûts liés à la masse des équipements.

**Définition 2** (disponibilité). *la disponibilité (availability) est la capacité d'un équipement à opérer de manière satisfaisante et efficace à tout instant.*

Ce chapitre pose le champ lexical et les définitions nécessaires à la compréhension de la problématique du Health Monitoring. Le contexte industriel est ensuite mis en lumière, et nous discutons

de l'intérêt du Health Monitoring dans l'aéronautique, et plus précisément pour les EHA dans le cadre de l'avion plus électrique. Les méthodes de diagnostic puis de pronostic sont présentées et discutées, notamment en regard de la spécificité de notre application.

## 1.1 Définitions et vocabulaire sur la vie et le vieillissement des équipements

Les équipements considérés sont des équipements complexes, ils peuvent être constitués de plusieurs composants. Au cours de sa vie opérationnelle, l'équipement a pour objectif de remplir un rôle pour servir l'utilisateur. Pour ce faire l'équipement doit assurer une ou plusieurs fonctions d'usage.

**Définition 3** (utilisateur). *L'utilisateur d'un équipement est l'entité qui se sert de l'équipement et à laquelle l'équipement est nécessaire et profitable.*

**Définition 4** (fonction). *Les fonctions sont les opérations de transformation de matière, d'énergie, et/ou d'informations, réalisées par un équipement ou ses composants et concourant à satisfaire un besoin de l'utilisateur.*

Au cours de son utilisation un équipement vieillit, il est abîmé, détérioré, usé. Le vieillissement est dû à des stress de plusieurs natures ; il est caractérisé par l'endommagement de l'équipement. Lorsqu'il est endommagé, il arrive alors que l'équipement ait une faute. On distingue les fautes progressives, caractérisées par un endommagement à croissance monotone et continue, et les fautes abruptes caractérisées par un endommagement à croissance discontinue.

**Définition 5** (endommagement). *L'endommagement caractérise le vieillissement d'un équipement. Il augmente au fur et à mesure de la vie de l'équipement.*

**Définition 6** (faute). *Une faute (fault, [IB97]) est une différence par rapport à des conditions standards/usuelles/acceptables d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système.*

**Définition 7** (mode de vieillissement). *Un mode de vieillissement caractérise l'évolution d'un équipement dans le temps, d'après la nature et la vitesse de la croissance d'un ou plusieurs endommagement(s).*

Le suivi de l'état de santé est devenu un facteur clé dans les stratégies de maintenance. Nous définissons l'état de santé d'un équipement de la manière suivante.

**Définition 8** (état de santé). *L'état de santé d'un équipement représente une propriété intrinsèque de l'équipement, caractérisée par la présence ou l'absence de fautes, et par la valeur de l'endommagement le cas échéant. C'est une cartographie de l'ensemble des fautes présentes sur l'équipement et leurs états d'avancement.*

**Définition 9** (suivi de l'état de santé). *Le suivi de l'état de santé consiste, grâce à une surveillance de l'équipement et à une somme de connaissances acquises au préalable sur l'équipement, à connaître l'évolution de son état de santé dans le passé, le présent, et le futur.*

Une faute se traduit généralement par une baisse de performance puis par une défaillance, voire une panne.

**Définition 10** (performance). *La performance d'une fonction caractérise le fait qu'elle remplisse son objectif de la manière attendue par l'utilisateur.*

**Définition 11** (défaillance). *Une défaillance (failure, [IB97]) est une interruption de la capacité*

*d'un système à effectuer une fonction requise dans des conditions opérationnelles spécifiées.*

**Définition 12** (panne). *Une panne est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser l'ensemble des fonctions requises sous des conditions opérationnelles spécifiées.*

L'état de santé des équipements a des répercussions au niveau fonctionnel, sur ce que nous décidons d'appeler l'état fonctionnel de l'équipement.

**Définition 13** (état fonctionnel). *L'état fonctionnel d'un équipement est caractérisé par la présence ou l'absence de défaillances, et par les pertes de performances de fonctions le cas échéant. C'est une cartographie de l'ensemble des pertes de performances et défaillances.*

Dans Health Monitoring le mot Health se traduit par état de santé. Les définitions de l'état de santé d'un équipement peuvent être plus ou moins précises et varient d'une publication scientifique à une autre. En général, l'état de santé peut être soit le fait d'avoir une faute ou non, soit le fait d'avoir une défaillance ou non, soit une caractérisation plus fine des fautes et défaillances. Pour plus de clarté, comme le montrent les définitions 8 et 13, nous avons choisi de séparer ce qui a trait aux dégradations et fautes de ce qui a trait aux performances et défaillances. En effet, nous pensons que les dégradations et les fautes sont intrinsèques à un composant, et peuvent être définies sans connaître l'utilisation du composant. Ce peut être par exemple la pollution d'un fluide. En revanche, performances et défaillances sont relatives aux attentes de l'utilisateur. Ce peut être par exemple une diminution de rendement mécanique, et seul l'utilisateur peut fixer les seuils acceptables de performance. C'est pourquoi nous avons choisi de séparer d'une part l'état de santé et d'autre part l'état fonctionnel de l'équipement. Ainsi, la connaissance de ces deux états donne une vue globale de la manière dont l'équipement se comporte et des causes physiques sous-jacentes à ce comportement.

## 1.2 Les enjeux du Health Monitoring dans l'industrie aéronautique

Les enjeux du Health Monitoring pour les industriels sont la maîtrise de la disponibilité opérationnelle, la tenue des exigences en sécurité, et la réduction du coût du cycle de vie. De plus, organiser le suivi de l'état de santé des équipements représente une belle innovation pour les industriels, qui peut leur permettre de rester compétitifs, notamment face à des pays où les coûts de main d'oeuvre et de production sont bas ([GTBS06]).

L'intérêt des industriels pour le Health Monitoring n'a cessé de croître ces dernières années, et ce dans tous les domaines. En démontre une recherche dans la base de brevets mondiale du site de l'INPI ([dIPI13]) que nous réalisons le 19 Septembre 2013. La recherche du mot clé "Health-Monitoring" renvoie 97 résultats en 2000, 274 résultats en 2006, 349 résultats en 2007, 373 résultats en 2008, 468 résultats en 2009, 529 résultats en 2010, 524 résultats en 2011, et enfin 869 résultats en 2012. En 12 ans nous voyons une multiplication par 9 du nombre de brevets déposés avec le mot-clé Health Monitoring.

En veut également pour preuve la quantité de publications en augmentation sur la CBM ([DGD<sup>+</sup>09]). Tous les domaines d'application sont concernés, comme par exemple l'automobile, l'aéronautique, le ferroviaire, les centrales énergétiques, les éoliennes, dans les domaines civils ou militaires. [GTBS06] analyse 175 publications scientifiques qui appuient ce constat sur la diversité des applications et l'intérêt croissant des industriels.



Le "Center for Intelligent Maintenance Systems" estime que, rien qu'aux USA, 35 milliards de dollars seraient économisés chaque année si la technologie CBM était largement employée ([CC10]).

Plusieurs initiatives ont lieu dans l'industrie pour développer les activités de Health Monitoring. Par exemple, un outil de calcul de fiabilité basé sur la méthodologie Fides ([FID13]) de fiabilité prévisionnelle des composants électroniques a été développé pour l'IMDR (Institut de Maîtrise Des Risques industriels) dans le cadre d'un projet mandaté par la DGA (Direction Générale de l'Armement). Développé par un consortium Industriel-Défense (Nexter, Airbus, Thales R&T, Thales Airborne System, MBDA, Thales Underwater Systems, Eurocopter), il a été accepté comme nouvelle référence IEC (International Electrotechnical Commission) par 76% des pays. L'IEC est une référence internationale pour les standards internationaux et l'évaluation de conformité pour toutes les technologies électriques, électroniques, et connexes.

On remarque tout de même qu'il y a encore un fossé entre les besoins des industriels et le niveau de maturité technologique (ou TRL de l'anglais Technology Readiness Level) effectivement atteint, car le développement du Health Monitoring se fait très progressivement. Dans l'aéronautique, on est le plus souvent à des niveaux de TRL 4 (phase de recherche, pouvant aller jusqu'à des essais en laboratoire et en environnement contrôlé), alors que l'on souhaite arriver à des niveaux de TRL 7 (c'est-à-dire "avionnable" : prototype bon pour vol) ou 8 (c'est-à-dire "certifié" : produit en service sur avion civil).

### 1.2.1 Vers l'avion plus électrique

L'avion plus électrique est un concept qui est apparu dans les années 70 ([LHMN07]). Le but est d'éliminer progressivement l'infrastructure hydraulique et mécanique pour la distribution de l'énergie dans l'aéronef, pour gagner en efficacité énergétique, en masse, en maintenabilité, en sécurité, et enfin en coût.

Actuellement, pour fournir l'énergie aux différents équipements, les avions sont équipés d'un réservoir ou bache hydraulique, dans lequel se trouve du fluide légèrement pressurisé, de l'ordre de quelques bars. Une pompe entraînée par l'un des moteurs de l'avion fait circuler ce fluide dans un vaste réseau de tuyauteries qui parcourt tout l'avion. La circulation se fait à un débit élevé, jusqu'à près de 200 litres par minute, sous une pression importante, de l'ordre de 200 à 350 bars sur les avions les plus récents. Lorsqu'un équipement placé le long de ce circuit a besoin d'énergie pour fonctionner, une vanne s'ouvre, laissant passer le fluide sous pression et le conduisant jusqu'aux actionneurs, permettant la mise en mouvement. En sortie de l'équipement, le fluide revenu à une faible pression retourne à la bache.

Pour des raisons évidentes de sécurité, le système de puissance hydraulique embarqué est redondant : il y a souvent trois circuits totalement indépendants les uns des autres, et même quatre pour le Boeing 747, comprenant chacun une pompe, une bache et un réseau de tuyauterie. Les équipements très critiques, comme le système de freinage par exemple, sont raccordés à deux circuits pour le cas où l'un tomberait en panne. Tout ceci a une masse non négligeable.

Bien que les configurations actuelles donnent satisfaction aux compagnies aériennes, un des défis permanents de l'aéronautique est de réduire la masse des avions, à la fois dans la structure et dans les systèmes embarqués, afin de réduire la consommation de carburant. Un des moyens

envisagés par les avionneurs et les équipementiers est précisément de gagner du poids sur la partie hydraulique. Les actionneurs électromécaniques (EMA) sont envisagés. Ils permettent un gain de masse car la puissance est distribuée sous forme de puissance électrique. Cependant l'énergie électrique ne peut pas pour le moment remplacer totalement l'énergie hydraulique dans les avions civils, car la technologie des EMA manque encore de maturité.

Ainsi, plutôt que d'acheminer sur une longue distance des quantités importantes de fluide hydraulique, une idée consiste à générer localement l'énergie hydraulique nécessaire pour actionner tel ou tel système. Des systèmes entièrement hydrauliques sont ainsi remplacés par des systèmes à génération hydraulique locale, où l'unité hydraulique est entraînée par une unité électrique. Ainsi, la vitesse et le sens de déplacement de la tige du vérin sont contrôlés par la vitesse et le sens de rotation d'une micro pompe qui elle-même est entraînée par un moteur électrique, situé à proximité immédiate du système. Cet ensemble est baptisé l'EHA. La figure 1.1 montre une Commande De Vol (CDV) hydraulique conventionnelle (une servovalve) et une CDV EHA intégrant le module EHM.

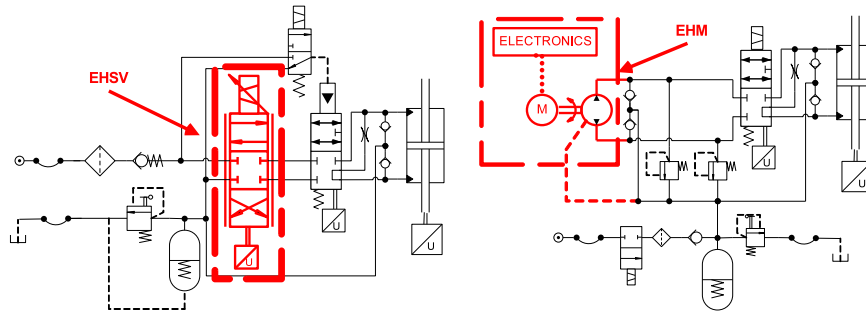


FIGURE 1.1 – Schémas hydrauliques d'une CDV hydraulique conventionnelle (à gauche) et de l'intégration du module EHA (à droite)

Dans le cas de la CDV hydraulique le système est complètement hydraulique. Une pompe hydraulique centralisée envoie le fluide vers tous les composants hydrauliques. La servovalve reçoit le fluide pressurisé et le distribue vers le vérin. Ce système comporte des tuyauteries de masse importante et génère une consommation énergétique non optimale car le réseau hydraulique est constamment pressurisé, quelle que soit la demande de l'équipement récepteur.

Dans le second cas, la servovalve est remplacée par un Module Electro-Hydrostatique (EHM) : un moteur et une pompe hydraulique. Le moteur entraîne la pompe hydraulique dans un sens ou dans l'autre. La pompe aspire le fluide dans l'accumulateur et le refoule vers un côté du vérin. L'expérience montre que cette évolution n'impacte en rien le bon fonctionnement des commandes de vol. Mais surtout, la masse et la consommation énergétique sont optimisées.

Nous voyons ici que le principe de la génération de puissance hydraulique change. La génération hydraulique centralisée commune à tous les systèmes et équipements est remplacée par une génération décentralisée. Cette énergie décentralisée peut être utilisée pour alimenter plusieurs actionneurs d'un même système, proches les uns des autres (par exemple, plusieurs couronnes de freins d'un même train d'atterrissage). Pour récapituler, les bénéfices de la solution décentralisée sont nombreux ([Mar06], [Mar07], [AF09]) :

- gain de masse dû à la suppression d'un circuit hydraulique complet : pompes, réservoirs, filtres et autres organes de génération et surtout le réseau de canalisations rempli de fluide et s'étendant sur tout l'avion ;

- optimisation de la consommation énergétique : la mise sous pression du réseau hydraulique dépend des conditions d'utilisation via la demande des équipements récepteurs. C'est ce que l'on nomme "Power on demand" ;
- accroissement de la sécurité grâce à une multiplication des sources de puissances (pompes et générateurs électriques) éliminant le risque de panne générale qui existe lorsque les sources de puissances sont toutes du même type ;
- optimisation de la maintenance qui est plus facile à réaliser sur des équipements électriques que sur des équipements hydrauliques. De plus, les sources potentielles de fuites hydrauliques sont diminuées, et surtout localisées ;
- réduction du volume de fluide consommé, ce qui va dans le sens de la protection de l'environnement.

### 1.2.2 Le développement d'un EHA pour les commandes de vol

Nous l'avons vu, la technologie EHA constitue la première rupture technologique vers un actionnement plus électrique des fonctions des avions. Choisie et développée sur certaines commandes de vol de l'A380, elle a notamment permis de concevoir une architecture avion dite "2H2E" permettant ainsi de supprimer un circuit hydraulique centralisé et de gagner plusieurs centaines de kilogrammes sur le bilan de masse total de l'avion.

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre d'un projet de *R&T* ayant pour but le développement d'un EHA pour les commandes de vol. Pour bien situer l'application, les différentes commandes de vol de l'A330 sont présentées sur la figure 1.2.

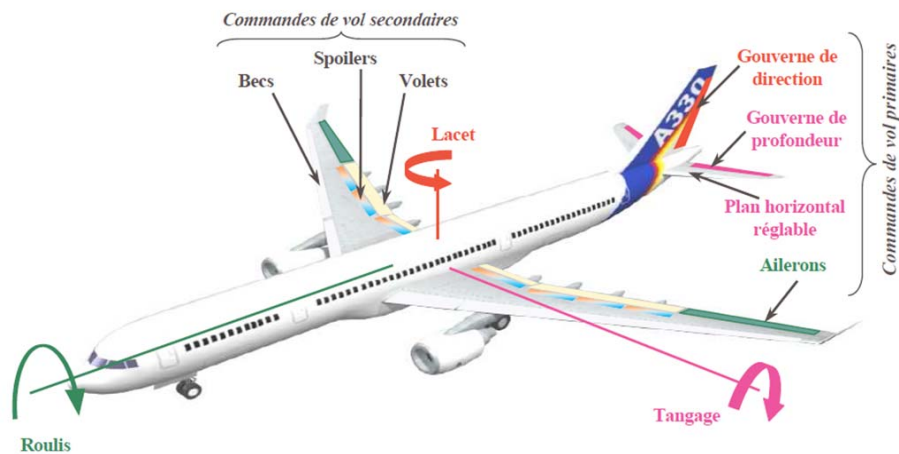


FIGURE 1.2 – Les commandes de vol de l'A330

Bien que les actionneurs de CDV soient redondants, il y a de hautes exigences de fiabilité : moins d'une défaillance catastrophique pour  $1.10^5$  heures de vol (FH pour *Flight Hour*) pour le Boeing F/A 18 Hornet et  $18.10^6$  pour le F-35AB ([BS04]). Pour les avions civils, les exigences sont encore plus contraignantes : moins d'une défaillance dangereuse pour  $1.10^7$  FH, et moins d'une défaillance catastrophique pour  $1.10^9$  FH.

Le marché d'étude du projet de *R&T* dans lequel s'inscrit la thèse vise notamment à :

- améliorer la fiabilité et la durée de vie du sous-système Moteur-Pompe afin de pouvoir proposer

- cette technologie comme mode normal d'actionnement des commandes de vol ;
- prolonger une initiative engagée depuis plusieurs années par Airbus et soutenue par MBD auprès du SAE (Society of Automotive Engineers) pour " standardiser " les ensembles EHA dans le but de réduire les coûts :
    - standardisation des pratiques de conception et de qualification ;
    - création d'une famille modulaire d'ensemble électronique / moteur / pompe.

Un des axes de recherche du projet consiste notamment à étudier et développer des méthodes de Health Monitoring afin de superviser l'état de santé des actionneurs.

Le développement d'un système de supervision des actionneurs EHA vise à anticiper l'apparition de pannes sur un actionneur EHA, avec pour objectif principal l'amélioration de la disponibilité opérationnelle de l'équipement, et pour objectif plus global l'optimisation des coûts liés à la maintenance. A terme, le développement des méthodes de Health Monitoring s'inscrit dans la volonté de proposer aux compagnies aériennes la mise en place d'une maintenance préventive intelligente et optimisée.

### 1.2.3 Le Health-Monitoring pour optimiser les coûts de maintenance

Le coût du cycle de vie (LCC pour *Life Cycle Cost*) est la somme de tous les coûts liés à la vie de l'avion depuis la conception jusqu'à la fin de la vie.

- le coût de conception, de développement, et de production ;
- le coût de maintenance programmée et non programmée en station de réparation ;
- le coût sur avion : les coûts de perte d'exploitation (retards et interruptions), et la maintenance sur avion ;
- les coûts fixes pour la compagnie : l'acquisition des "spares" (stocks de pièces de rechange), l'acquisition des équipements neufs, les outillages ;
- le coût de déconstruction et de recyclage en fin de vie.

L'objectif pour l'avionneur et pour l'équipementier est d'optimiser ces coûts. Cependant beaucoup de ces coûts sont incompressibles. L'un des seuls leviers possibles est le coût de la maintenance non programmée, qui entraîne des retards ou des interruptions d'opération, et est synonyme de coûts élevés.

Selon la définition de l'Association Française de Normalisation (AFNOR), la maintenance vise à maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer une fonction déterminée. La maintenance regroupe ainsi les actions de dépannage et de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements matériels ou logiciels. Il existe deux types de maintenance :

- la maintenance préventive, ayant pour objectif de prévenir les pannes. Il s'agit d'une maintenance programmée : un remplacement systématique de certains équipements est effectué avant que la panne ne survienne.
- la maintenance corrective, consistant à rétablir le système après une panne. Il s'agit d'une maintenance non programmée.

L'efficacité de la maintenance représente un enjeu économique majeur. Les compagnies aériennes sont particulièrement concernées car les opérations de maintenance, nécessaires au maintien de la sécurité et de la disponibilité opérationnelle de leur flotte, représentent une part importante des coûts directs d'exploitation.

Les coûts de maintenance comportent les coûts liés aux opérations de maintenance programmées à l'avance suite aux recommandations de l'équipementier, et les coûts liés aux opérations de maintenance non programmées survenant suite à une panne. Le calcul des coûts de maintenance et de perte d'exploitation prend en compte les coûts d'outillage, de main d'oeuvre, la fréquence et la durée de la tâche, les coûts de localisation de la panne, de remplacement du matériel, la phase de détection de la panne (avant le départ, durant le roulage, au décollage, en vol, à l'atterrissage), et les coûts engendrés par le retard de l'avion ou par l'annulation du vol.

Les coûts de maintenance sont généralement garantis par l'équipementier : s'ils dépassent un certain niveau, c'est à l'équipementier de payer. Il faut donc absolument maîtriser ces coûts dès le départ. Cela permet aussi de rester compétitif face aux autres équipementiers.

La stratégie de maintenance dépend de la compagnie aérienne, mais en général la maintenance préventive coûte moins cher sur le long terme que la maintenance corrective, puisque même si des heures de vol sont "perdues" au moment de la maintenance, certaines pannes sont évitées. C'est donc la maintenance préventive que l'on souhaite privilégier, mais pour qu'elle soit vraiment efficace il faut pouvoir estimer au plus juste les futurs instants de panne. L'objectif est de réduire considérablement le nombre de pannes non prévues et par là-même le nombre de retards et d'interruptions d'opération.

Une maintenance surabondante, c'est-à-dire réalisée plusieurs fois avant le risque de défaillance et qui n'exploite donc pas toute la durée de vie de l'équipement, pourrait avantageusement être remplacée par une maintenance adaptative prenant en compte le vieillissement et la dégradation du système pour être réalisée au moment opportun, juste avant la défaillance. Dans le cas contraire, où la maintenance est programmée trop tard et ne permet pas d'éviter l'apparition de la panne, cela entraîne également un surcoût, qui est cette fois doublé d'un risque pour la sécurité. Il est donc important d'optimiser les actions de maintenance et leur périodicité en fonction de l'état effectif de l'équipement et d'éventuelles prévisions issues de l'analyse de paramètres significatifs de la dégradation du système. Cela permet de réduire la durée d'immobilisation du système en minimisant la durée des interventions et le nombre d'actions de maintenance.

Pour résumer le système de Health Monitoring vise à minimiser :

- les coûts de localisation de la panne grâce à un module de diagnostic qui permet de connaître le composant défectueux et de réduire au minimum le temps de localisation de la panne, et d'éviter le démontage systématique de composants d'équipements sains (c'est-à-dire diminuer le taux de No Fault Found) ;
- les coûts liés aux pertes d'exploitation grâce à un module de pronostic. L'anticipation de l'apparition d'une panne permet d'effectuer les opérations de maintenance juste avant de risquer une interruption de bon fonctionnement.

#### 1.2.4 Conclusion

Dans cette section les enjeux du Health Monitoring pour l'industrie, et plus particulièrement pour l'industrie aéronautique ont été présentés. Le projet d'avion tout électrique encourage l'utilisation d'EHA, dont le point faible est encore aujourd'hui la fiabilité. Le développement d'une méthode de Health Monitoring pour une telle application est critique pour les équipementiers et les avionneurs, avec l'objectif d'optimiser les coûts de maintenance et d'assurer la disponibilité opérationnelle de l'équipement.

Le suivi de l'état de santé est composé essentiellement d'une partie diagnostic et d'une partie pronostic, qui sont l'objet des sections suivantes.

## 1.3 Le diagnostic

### 1.3.1 Définition

Le diagnostic a pour objet d'étude la manière dont a vieilli un équipement. Nous le définissons comme suit :

**Définition 14** (diagnostic). *Le diagnostic est l'action qui permet d'accéder à la connaissance de l'état de l'équipement à l'instant présent.*

Pour réaliser cette tâche le module de diagnostic a besoin d'informations sur le comportement du système. Le module de surveillance se charge de fournir ces informations, après les avoir récupérées via des observations (grâce aux capteurs). La première phase du diagnostic est la détection de faute. En général la détection est faite au niveau fonctionnel, on observe que le système passe d'un fonctionnement normal/usuel à un fonctionnement qui ne l'est plus.

**Définition 15** (détection de faute). *La détection de faute est la détermination de la présence d'une faute dans le système et de l'instant de son apparition.*

Pour suivre notre logique de distinguer l'état de santé et l'état fonctionnel, on choisit de définir le diagnostic de santé et le diagnostic fonctionnel, suivant l'état que l'on s'attache à connaître.

**Définition 16** (diagnostic de santé). *Le diagnostic de santé est la caractérisation de l'état de santé de l'équipement via une phase d'isolation et d'identification de la faute*

**Définition 17** (isolation de faute). *L'isolation de faute (fault isolation, [IB97]) est la détermination de la nature de la faute et localisation de celle-ci dans l'équipement.*

**Définition 18** (identification de faute). *L'identification de faute (fault identification, [IB97]) est la détermination de la taille de la faute, de son caractère évolutif dans le temps, et de son état d'avancement le cas échéant.*

La sortie du module de diagnostic de santé est l'état de santé de l'équipement (voir la définition 8). Cette définition de diagnostic que nous proposons est une extension de la définition classique. Dans la littérature le diagnostic de santé existe parfois sous le nom de diagnostic avancé car il donne des informations détaillées sur l'état physique de l'équipement. Le deuxième type de diagnostic est alors ce que nous appelons le diagnostic fonctionnel, dont la sortie est l'état fonctionnel de l'équipement (voir la définition 13).

**Définition 19** (diagnostic fonctionnel). *Le diagnostic fonctionnel est la caractérisation de l'état fonctionnel de l'équipement via l'étude des disponibilités des fonctions et des éventuelles baisses de performance.*

Les deux diagnostics sont liés. Le diagnostic de santé peut permettre de déduire l'état fonctionnel grâce à la connaissance des conséquences de fautes sur les défaillances, et donc être un prélude au diagnostic fonctionnel. Le diagnostic fonctionnel peut permettre d'abduire l'état de santé.

### 1.3.2 Les méthodes de diagnostic

Le principe du diagnostic est de comparer le comportement observé du système avec des comportements de référence. Il existe de nombreuses méthodes de diagnostic, classées en trois grandes catégories :

- les méthodes basées sur l'expérience ;
- les méthodes guidées par les données ;
- les méthodes basées sur des modèles physiques.

Ces méthodes sont décrites dans les paragraphes suivants. Cette description sera brève. En effet, les méthodes de diagnostic sont bien connues et de nombreux états de l'art très bien construits existent (voir par exemple [Rib09], [Bel12] ou d'autres travaux de thèse du domaine), et notre effort de synthèse de l'état de l'art porte essentiellement sur le pronostic qui est plus récent et beaucoup moins bien connu.

#### 1.3.2.1 Diagnostic basé sur l'expérience

Cette méthode est utilisée en l'absence de modèle physique, et lorsque la connaissance sur le comportement est disponible grâce à l'expérience acquise sur l'équipement.

**Principe** Les méthodes de diagnostic à base de connaissances sont utilisées lorsque les observations sont de type symbolique. Elles exploitent une connaissance qualitative du système. Elles utilisent des relations causales de la forme : Faute  $\Rightarrow$  Défaillance  $\Rightarrow$  Symptôme.

Le symptôme est une manifestation observable de la faute. Ces connaissances proviennent d'une analyse fonctionnelle et structurelle du système de type Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE). Pour plus d'informations, il est possible de se référer à [Mor13] qui présente la démarche et les méthodes AMDE. La connaissance peut aussi prendre la forme d'arbre de défaillance, comme montré chez [Vi197].

Une autre approche est le diagnostic par système expert, dont une présentation est faite dans [Jac98]. Un système expert est composé de deux parties indépendantes :

- une base de connaissance composée d'une base de faits qui contient les informations et les données concernant le cas traité et d'une base de règles connues qui modélisent la connaissance du domaine considéré ;
- un moteur d'inférence capable de raisonner à partir des informations contenues dans la base de connaissance et de faire des déductions pour produire de nouvelles données.

. Le rôle d'un système expert est donc d'inférer des règles du type :

*SI* [A = "vrai"] *ET* [A implique B] *ALORS* [B = "vrai"]

Au fur et à mesure que les règles sont appliquées, des nouveaux faits se déduisent et se rajoutent à la base de faits. Le diagnostic par systèmes experts se fonde sur l'expérience disponible sur le système pour construire une table de correspondance qui associe les observations aux diagnostics correspondants. C'est l'expertise confrontée à l'observation de symptômes qui permet de déduire la nature de la faute [Dub01].

Le principe de la méthode de diagnostic basé sur l'expérience est présenté sur la figure 1.3.

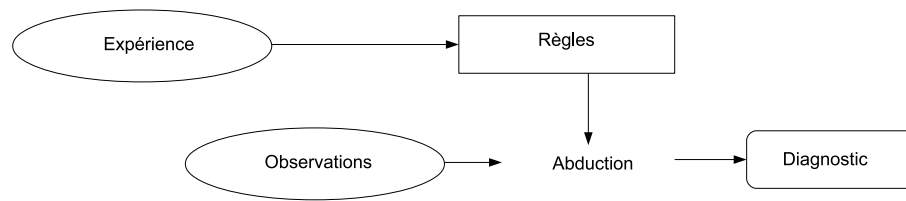


FIGURE 1.3 – Principe de la méthode de diagnostic basé sur l'expérience

**Avantages et inconvénients** Le principal avantage de ces méthodes est le fait qu'elles sont assez simples et peu coûteuses à mettre en place. Par contre la connaissance acquise n'est pas précise, et si le système évolue les règles sont à remettre en cause.

### 1.3.2.2 Diagnostic guidé par les données

Ces méthodes sont utilisées lorsque le modèle analytique de l'équipement n'est pas disponible ou lorsque la complexité du procédé le rend inexploitable, mais que des données issues de l'observation du système sont disponibles.

Il y a plusieurs méthodes de détection de faute qui ne nécessitent pas l'utilisation d'un modèle physique : c'est le cas par exemple de l'analyse vibratoire, de l'analyse thermographique, et de l'analyse des lubrifiants et des particules d'usure. Dans ce cas, les valeurs des variables concernées en mode nominal sont connues et on procède à la détection de comportement non nominal grâce à une vérification de limites ([Dub01], [Tra05], [Ise05a]).

- Vérification de valeur absolue : on vérifie que le signal est en tout temps compris entre un seuil minimal et un seuil maximal. Cette méthode simple est appliquée pour vérifier par exemple qu'une pression reste bien au-dessus d'un seuil minimum, ou que la température reste bien en deça d'un seuil maximum, pour détecter un éventuel défaut dans les moteurs à combustion ([Ise05b]).
- Vérification de tendance : on vérifie que la dérivée du signal par rapport au temps est toujours comprise entre les dérivées par rapport au temps des deux seuils. La vérification de tendance s'utilise par exemple pour vérifier l'augmentation des vibrations liées à des défauts de roulements à billes ou à l'usure de machines.

Ces deux vérifications peuvent être utilisées simultanément. La détermination de la valeur des seuils est très importante : des seuils trop étroits peuvent engendrer de fausses alarmes, alors que des seuils trop larges risquent de cacher des défauts. Pour plus de précision, on peut utiliser des seuils adaptatifs, qui changent dépendamment de l'entrée du système (entrées physiques, excitations, perturbations...).

Il y a également plusieurs méthodes de détection de faute grâce à des tests statistiques que l'on ne présentera pas ici mais qui sont explicitées dans [Tra05].

**Principe** La connaissance utilisée est une base de données issue de l'équipement, soit enregistrée dans un historique obtenu en service ou en essais, soit observée en temps réel. Un modèle de référence du système est établi grâce à des méthodes de reconnaissance de formes, de type réseaux de neurones et logique floue. Ces méthodes ne nécessitent aucun modèle physique puisque l'information est extraite des données elles-mêmes.



On procède à l'identification des classes ou modes à partir de la base de connaissances [Rib09]. Ce peut être des modes nominaux ou des modes associés à une défaillance. Les phénomènes de dégradation représentent une dérive du système d'un mode normal vers un mode de faute. Lors de la dérive, les observations ne respectent plus les modèles des classes d'origine, elles suivent une nouvelle allure (direction, vitesse) imposée par la nature de la dérive. Le diagnostic consiste à déterminer le mode dans lequel évolue le système. Le principe de la méthode de diagnostic guidée par les données est présenté sur la figure 1.4.

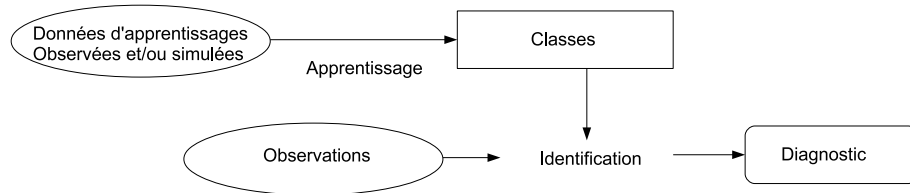


FIGURE 1.4 – Principe de la méthode de diagnostic guidée par les données

On trouve de nombreux exemples de diagnostic guidé par les données dans la littérature, par exemple [BBS09] diagnostique un EMA et notamment les fautes sur les capteurs et sur la vis-à-billes grâce à un réseau de neurones entraîné sur des mesures de vibrations issues d'essais dédiés.

**Avantages et inconvénients** La méthode à base de données ne nécessite pas de connaissance physique approfondie du système mais seulement d'observations.

Le principal inconvénient de cette méthode réside dans la dépendance des résultats à la quantité et à la qualité des données utilisées. Un autre inconvénient est le fait qu'il s'agit d'un diagnostic externe, qui ne donne pas d'information sur la physique des fautes.

### 1.3.2.3 Diagnostic à base de modèle

Cette méthode est utilisée lorsqu'un modèle analytique de l'équipement est disponible. Ce modèle doit représenter le comportement nominal de l'équipement, mais aussi le comportement en présence de fautes.

**Principe** Le diagnostic à base de modèle requiert une connaissance physique profonde de l'équipement à diagnostiquer. Le principe est de comparer le comportement réel observé sur l'équipement grâce à des capteurs placés stratégiquement au comportement du modèle de l'équipement.

En cas d'incohérence entre le modèle de bon comportement et les observations, une alarme est déclenchée : c'est la phase de détection de la faute.

Un ou plusieurs modèles de faute sont alors utilisés pour localiser et identifier la faute. Pour tester la cohérence entre le modèle et le système réel, des résidus sont calculés : ils représentent l'écart entre le signal observé et le signal estimé par le modèle. Un résidu nul signifie que les deux réponses sont identiques. Un résidu non nul correspond à une différence entre le monde réel et le modèle, ce qui signifie que le modèle ne représente pas le comportement de l'équipement.

Lorsqu'une faute apparaît, certains résidus ont une valeur proche de zéro tandis que d'autres résidus ont une valeur non nulle. La signature d'une faute est l'ensemble des valeurs des résidus lors de cette faute.

Le principe du diagnostic à base de modèle, présenté sur la figure 1.5, est le suivant. L'observation de l'équipement permet l'acquisition des signatures, qui sont alors comparées avec les signatures de référence des modèles. L'interprétation de la signature permet de réaliser le diagnostic de la faute.

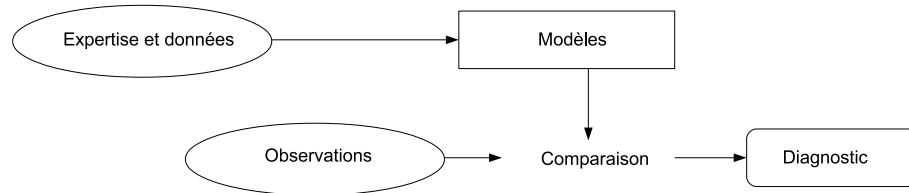


FIGURE 1.5 – Principe de la méthode de diagnostic à base de modèles

Cette méthode suppose que l'on se place dans le monde clos où tous les modèles de faute à considérer ont été construits et analysés.

[Ise05b] présente plus en détails le diagnostic à base de modèles. On distingue l'approche quantitative et l'approche qualitative.

**L'approche quantitative** Le modèle peut être basé sur les équations physiques régissant le comportement du système, ou ce peut être un modèle type boîte noire, ce qui signifie que l'on ajuste les paramètres du modèle à partir de données recueillies.

**Définition 20** (modèle quantitatif). *Un modèle quantitatif est un ensemble de relations statiques et dynamiques entre les variables et les paramètres du système permettant de décrire son comportement en termes mathématiques quantitatifs.*

Les modèles peuvent être dans le domaine temporel, ce sont les modèles d'état, en temps continu ou échantillonné, ou dans le domaine fréquentiel, il s'agit alors de représentation par fonctions de transfert.

Dans l'approche quantitative, le système est représenté avec une certaine précision numérique. Le modèle de référence est restreint aux entrées et sorties observables.

Les modèles peuvent être de différentes natures : modèles à éléments finis, modèles numériques, modèles analytiques, ou encore modèle d'identification. Dans le cas de systèmes complexes il est souvent impossible d'avoir un modèle prenant en compte tous les processus physiques mis en jeu. Il est alors possible de présumer d'une certaine forme pour le modèle dynamique et d'utiliser les observations pour déterminer les paramètres du modèle.

Le principal inconvénient de cette approche quantitative réside dans la difficulté à modéliser un système non linéaire et complexe qui puisse être utilisé dans le cadre du diagnostic avec garanties de succès.

Trois techniques reposant sur des modèles quantitatifs sont présentées ci-dessous.

Les techniques d'observateur et d'estimateur d'état consistent à reconstruire les sorties non me-

surables du système par une estimation de l'état du système. Des observateurs de sortie ou observateurs fonctionnels permettent de reconstruire la sortie par un modèle d'espace d'état. Ce modèle génère des résidus indépendants des entrées qu'elles soient mesurables ou non.

L'estimation paramétrique permet d'analyser l'influence des fautes sur les paramètres structuraux du modèle du système. Elle utilise des méthodes analytiques pour calculer les valeurs des paramètres du modèle dont la structure est connue, grâce à des techniques de filtrage. Par exemple, le filtre de Kalman estime de manière récursive les paramètres structuraux d'un modèle linéaire sous forme de représentation d'état à partir de mesures bruitées. La présence d'un résidu est évaluée en comparant les paramètres estimés avec les paramètres nominaux qui caractérisent le comportement normal du système. L'application du filtre de Kalman est particulièrement adaptée pour les systèmes avec un grand nombre de variables d'état et des signaux très bruités.

La technique de l'espace de parité consiste à éliminer les variables d'état inconnues des équations du système grâce aux relations de redondance analytique parmi les entrées et les sorties du système, pour arriver à une équation dans laquelle toutes les variables sont observables et calculables. L'avantage de cette approche réside dans sa simplicité. Il est possible de construire des systèmes d'instrumentation permettant de la mettre en place. De plus, elle s'étend à la surveillance des systèmes non linéaires.

**L'approche qualitative** L'approche qualitative est basée sur le même principe que l'approche quantitative, mais les relations entre descripteurs et variables du système sont exprimées au moyen de fonctions qualitatives, qui représentent bien les interactions entre les composants. Généralement le modèle a la forme de relations logiques modélisant le comportement du système.

**Définition 21** (modèle qualitatif). *Un modèle qualitatif est un ensemble de relations statiques et dynamiques entre les variables et les paramètres du système permettant de décrire son comportement en termes qualitatifs tels que les causalités ou des règles du type si-alors.*

Une revue des travaux sur cette approche de diagnostic est présentée chez [HCdK92]. L'approche est basée sur l'étude de conflits, qui sont les incohérences entre les observations et les sorties des modèles qualitatifs. Ils sont l'équivalent des résidus pour les méthodes quantitatives. Cette méthode est plus robuste que l'approche quantitative, mais elle dépend fortement de la connaissance à priori de l'expert sur le système.

[CDL<sup>+</sup>04] présente un cadre formel qui permet de comparer les deux approches à base de modèles et surtout de les unifier en établissant des équivalences entre elles.

**Avantages et inconvénients** L'inconvénient principal est que ces méthodes requièrent une connaissance précise du système et de son environnement, permettant de les modéliser.

Cependant les modèles physiques sont relativement bien maîtrisés par les équipementiers grâce à la phase de conception des équipements, qui peut être réalisée à base de modèles. De plus l'avantage de cette méthode est que la connaissance des modes de faute a une signification physique, et que le modèle peut être adapté pour représenter plus ou moins finement le système, les entrées et les perturbations extérieures.

### 1.3.3 Conclusion

Dans cette section les trois grandes méthodes de diagnostic ont été présentées. Nous réalisons que le principe est le même pour les trois méthodes : il s'agit d'observer le système et de comparer les observations avec une base de connaissances préalable, pour savoir quel est l'état de santé du système qui a pu mener à de telles observations.

La base de connaissances peut être soit un ensemble de règles issues de l'expérience, soit un ensemble de classes de comportement apprises sur des données, soit un ensemble de modèles du système en comportement nominal et en faute. Plus la base de connaissances en entrée est riche, et plus les informations en sortie sont riches, les plus riches étant apportées par la méthode à base de modèles qui donne des informations sur les phénomènes physiques liés aux dégradations et aux fautes. La méthode choisie dépend de la connaissance disponible et des informations souhaitées, plusieurs méthodes peuvent être appliquées simultanément.

Pour notre application, peu de données de fautes sont disponibles tandis qu'un modèle analytique de comportement nominal existe. De plus nous avons besoin d'une méthode générique et d'avoir des informations précises sur l'état de santé du système pour optimiser au mieux les opérations de maintenance et pour avoir une base solide pour le pronostic. Nous privilégions donc lorsque ce sera possible la méthode à base de modèles.

## 1.4 Le pronostic

### 1.4.1 Définition

A la suite du diagnostic, qui a pour objet d'étude la manière dont a vieilli un équipement, le pronostic a pour objet d'étude la manière dont il va vieillir. Définissons tout d'abord la durée de vie utile d'un équipement qui est un concept clé dans le domaine du pronostic.

**Définition 22** (durée de vie utile). *La durée de vie utile est le temps restant jusqu'à la défaillance. Elle est souvent notée RUL de l'anglais Remaining Useful Life.*

Le premier pas vers le pronostic est l'étude de la fiabilité.

**Définition 23** (fiabilité). *La fiabilité d'un équipement est la probabilité qu'il fonctionne sans défaillance pendant une durée donnée et dans des conditions données. La variable temporelle pour la durée est à définir suivant le type d'équipement : kilomètres, heures, nombre de cycles, nombre de tours, nombre de vols, etc.*

La fiabilité  $R$  d'un équipement est représentée mathématiquement comme  $R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0}$  où  $N_0$  est le nombre d'équipements dans la population initiale et  $N_s(t)$  est le nombre de survivants à l'instant  $t$ .

On définit le taux de défaillance  $\lambda$  à un instant  $t$  comme  $\lambda(t) = \frac{N_s(t) - N_s(t - \delta t)}{\delta t} = \frac{1}{R(t)} \frac{dR}{dt}$ .

Si  $N_f$  est le nombre de défaillances pendant une durée  $dt$ , la fonction de densité de probabilité de défaillance à l'instant  $t$  est alors  $f(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dN_f}{dt} = \frac{dR}{dt} = R(t) \times \lambda(t)$ .

Cependant l'étude de la fiabilité a des limitations, dont la principale est le manque d'informations pertinentes apportées par ces études de fiabilité lorsque l'on s'intéresse non pas à une population mais à un équipement particulier. C'est pourquoi des méthodes plus poussées sont développées

pour estimer le futur état des équipements. Le domaine du pronostic, qui englobe la fiabilité, s'élargit et progresse.

Le pronostic étant une activité relativement récente, il n'y a pas de consensus autour de sa définition précise. Dans la littérature, on retrouve plusieurs définitions :

- calcul de RUL ([LNP<sup>+</sup>03], [HZTM09], [CC04], [CC10], [BS04], [GP02]);
- prédiction de la durée de vie d'un système jusqu'à la faute à la suite de la détection d'un endommagement ([DGD<sup>+</sup>09] [GTBS06]);
- probabilité qu'il n'y ait pas de faute à un instant futur donné ([DGD<sup>+</sup>09], [HZTM09]);
- prédiction de la durée de vie restante avant la faute associée à la probabilité d'une opération fiable dans le futur ([HZTM09]);
- détermination de l'état de santé futur ([BGW<sup>+</sup>02], [MCP<sup>+</sup>01]);
- détection des précurseurs d'une faute et calcul du temps restant avant la faute ([SG09]);
- détermination de ce qui se passera à l'instant  $t + dt$  ([Mul05]);
- enfin, la définition de l'ISO (*International Organization for Standardization*) est disponible depuis 2004 et définit le pronostic comme l'estimation du temps restant avant la faute et l'estimation du risque d'une ou plusieurs défaillances existantes ou prédites.

La définition que nous choisissons pour le pronostic est la suivante :

**Définition 24** (pronostic). *Le pronostic est la prédiction de la chronologie d'évolution de l'état de l'équipement dans le futur, à partir de la connaissance présente.*

**Définition 25** (prédiction). *Une prédiction est une estimation dans le futur.*

Cette définition synthétise et précise les définitions trouvées dans la littérature. La connaissance de l'état englobe à la fois l'aspect santé et l'aspect fonctionnel, nous trouvons donc que cette définition est plus complète que des définitions basées uniquement sur l'instant de faute ou de défaillance. Notre définition montre que l'on s'intéresse à l'évolution dans le futur, et non pas aux seuls instants de faute ou de défaillance, ce qui permet une meilleure connaissance et une meilleure anticipation des fautes et défaillances à venir.

Comme pour le diagnostic, nous choisissons de définir un pronostic de santé et un pronostic fonctionnel. Le pronostic de santé s'attache à la prédiction de l'évolution de l'état de santé de l'équipement dans le futur. Il s'attache bien sûr également à la prédiction des instants d'apparition de fautes sur l'équipement. En sortie du module de pronostic, on obtiendra le temps restant durant lequel l'équipement n'aura pas de faute. On obtiendra également une séquence d'apparition de fautes (quelles fautes, sur quels composants, et état d'avancement des fautes) et les instants associés. Notre définition du pronostic de santé est la suivante.

**Définition 26** (pronostic de santé). *Le pronostic de santé est la caractérisation de la chronologie d'évolution de l'état de santé futur de l'équipement via la prédiction de l'évolution des fautes dans le futur.*

Le pronostic fonctionnel s'attache à la prédiction du RUL et des instants d'apparition de défaillance sur l'équipement. Il peut se baser sur la chronologie prédite pour l'évolution future de l'état de santé pour anticiper et prévenir l'apparition de problèmes fonctionnels.

**Définition 27** (pronostic fonctionnel). *Le pronostic fonctionnel est la caractérisation de la chronologie d'évolution de l'état fonctionnel de l'équipement dans le futur via la prédiction des disponibilités des fonctions et des éventuelles baisses de performance.*

Nous avons remarqué que pour le diagnostic, en général, ce sont les conséquences des fautes sur les fonctions qui sont observables et permettent d'abduire l'état de santé. Pour le pronostic le

processus est différent. C'est en général la projection dans le futur de l'état de santé du système qui permet de déduire les conséquences dans le futur sur l'aspect fonctionnel.

### 1.4.2 Les méthodes de pronostic

Il existe plusieurs méthodes de pronostic, dépendant de la connaissance que l'on a sur le vieillissement de l'équipement considéré. La classification des méthodes pour le pronostic est identique à celle des méthodes pour le diagnostic. On distingue :

- les méthodes basées sur l'expérience
- les méthodes guidées par les données
- les méthodes de pronostic basées sur un modèle physique

Chaque approche a ses propres avantages et inconvénients, et en pratique plusieurs méthodes sont souvent combinées.

#### 1.4.2.1 Pronostic basé sur l'expérience

Lorsque l'on ne dispose ni de capteurs ni d'un modèle physique du vieillissement de l'équipement, la seule alternative possible est d'utiliser une approche statistique. Cette méthode est basée sur l'historique de l'équipement ([GEP09]).

**Principe** L'historique des défaillances représente, sous forme de nuage de points, la durée de vie de l'équipement en fonction des fautes qui sont apparues, et/ou des conditions d'utilisation. Cet historique est utilisé pour déterminer une loi statistique représentant la probabilité de défaillance de l'équipement dans le futur. Le principe de la méthode de pronostic basé sur l'expérience est présenté sur la figure 1.6. La loi de vieillissement, statistique, représente la probabilité de survie ou le risque de défaillance dans les instants futurs.

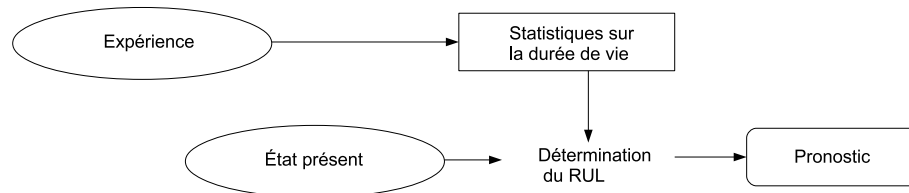


FIGURE 1.6 – Principe de la méthode de pronostic basé sur l'expérience

**Techniques** Cette méthode de pronostic est très intimement liée à l'étude de la fiabilité des équipements. Une étude statistique est réalisée à partir de retours d'expérience sur les durées de vie.

[vNK02] applique cette méthode dans la modélisation du coût de remplacement de ponts. Les distributions de durée de vie sont calculées sous la forme de distribution de Weibull (grâce à la méthode du maximum de vraisemblance) sur la base de la durée de vie des ponts déjà démolis (ce qui entraîne une sous estimation de la durée de vie car ils ont été démolis avant la fin de vie utile), et de l'âge des ponts actuels (qui sont des données censurées à droite). Le coût de

remplacement des ponts est ensuite calculé en prenant en compte leur âge et l'incertitude dans le futur instant de remplacement.

[AHL<sup>+</sup>13] utilise les arbres causaux formés par la combinaison d'états séquentiels de dégradation physique menant à un mode de défaillance pour prédire le mode de défaillance d'enroulements statoriques de générateurs hydrauliques. Le module de pronostic identifie les mécanismes de défaillance actifs et estime leurs avancements.

**Avantages** Il s'agit de l'approche la moins complexe, qui nécessite des données d'entrée accessibles sans effort dédié : on a seulement besoin d'un retour d'expérience sur la durée de vie des équipements.

**Inconvénients** Au niveau des connaissances nécessaires, cette méthode souffre parfois du manque de données de retour d'expérience. C'est le cas notamment lorsque les équipements sont très innovants, ou alors très fiables et surdimensionnés, et connaissent rarement une fin de vie utile en service ou même en essais, comme c'est le cas dans l'aéronautique. C'est également le cas des équipements nouveaux ou produits en faible série, ou alors des équipements pour lesquels la maintenance est préventive et intervient toujours avant la fin de vie utile (on ne sait donc pas combien de temps restait vraiment avant la fin de vie utile).

Au niveau des résultats, cette méthode est la moins précise, elle apporte peu d'informations, car elle ne permet pas d'évaluer l'état de dégradation de l'équipement.

De plus elle ne tient généralement pas compte de la manière dont l'équipement est utilisé, ni de son passé. Les tests sont réalisés sur une population d'individus par hypothèse identiques, dans des conditions environnementales représentatives des conditions de travail réelles. Les approches statistiques donnent une estimation générale pour une population entière d'unités identiques. Ce type d'estimation est utile pour le fabricant qui produit les unités en gros volumes mais n'a pas beaucoup d'intérêt pour l'utilisateur qui s'intéresse à un composant en particulier et ne s'intéresse pas au temps moyen avant la panne de toute la population. Les systèmes n'évoluent en réalité pas de la même manière durant leur vie opérationnelle. Il faut prendre en compte les variabilités propres de la production et de l'exploitation. C'est d'autant plus vrai dans l'aéronautique où les composants ne sont pas soumis qu'aux variabilités liées à la conception, mais aussi à des conditions météorologiques différentes selon les routes assignées, la fréquence et la durée des vols, les consignes de pilotage données aux pilotes.

La maintenance préventive basée sur les statistiques peut entraîner un changement prématuré d'équipement ayant toujours un RUL élevé, car les équipements sont très fiables et les marges de sécurité sont élevées. Cela signifie qu'une partie de l'utilisation de l'équipement est perdue, que les coûts de maintenance ne sont pas optimisés, que la disponibilité pour les missions est diminuée, et qu'il y a des risques d'augmenter les fautes induites par la maintenance.

#### 1.4.2.2 Pronostic guidé par les données

Cette méthode est utilisée dans le cas où des observations en ligne sont disponibles mais où on ne possède pas suffisamment de connaissances physiques sur le vieillissement de l'équipement.

Elle nécessite une connaissance à priori de ses modes de fonctionnement normaux et en faute. [Hu11] présente notamment les algorithmes de pronostic basés sur les données.

**Principe** L’approche est basée sur le suivi de l’évolution d’indicateurs de dégradation dans le temps, comme le montre la figure 1.7. Les indicateurs de dégradation sont des grandeurs mesurables du système dont la valeur évolue de manière caractéristique pendant les dégradations. Ces indicateurs n’ont pas de signification physique. La relation entre l’évolution des indicateurs et l’évolution des dégradations se fait généralement en aval. Les indicateurs de dégradation peuvent ensuite être utilisés pour prédire l’évolution de défaillances, et donner des estimations de la durée de vie résiduelle. Dans ce cas, la loi de vieillissement est basée sur les données : elle représente l’évolution d’un indicateur de dégradation, et sa projection temporelle dans le futur.

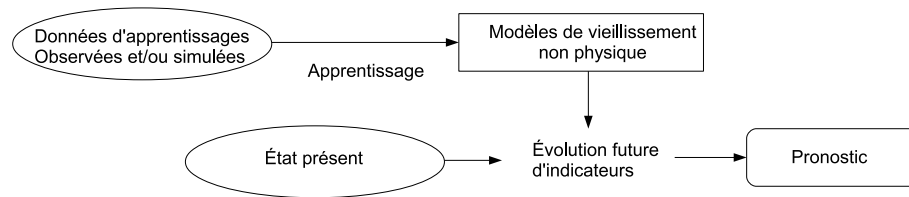


FIGURE 1.7 – Principe de la méthode de pronostic guidée par les données

**Techniques** Les indicateurs de dégradation sont obtenus en mettant en relation les observations et l’historique de défaillances. A chaque évolution de dégradation du système correspond une évolution des valeurs des indicateurs de dégradation.

Le pronostic guidé par les données est divisé en trois familles :

- Le pronostic de tendance évolutif/statistique. Les motifs de faute sont connus à partir de l’historique grâce à des techniques statistiques : méthode statistique multivariable PCA, analyse du signal.
- Le pronostic basé sur l’intelligence artificielle. Les techniques d’apprentissage utilisées sur les données utilisent par exemple les réseaux de neurones, la logique floue, ou encore les réseaux bayésiens.
- Le pronostic par l’estimation d’état repose sur des techniques d’estimateurs d’état ou de paramètre, utilisant par exemple des filtres de Kalman.

Les réseaux neuronaux permettent de créer une boîte grise noire qui estime et prédit la tendance de la dégradation de l’état d’un système au moyen des informations des indicateurs caractéristiques du système. Cette prédiction est basée sur l’apprentissage du réseau. Les réseaux neuronaux sont très rapides et intrinsèquement tolérants aux fautes et peuvent faire des tâches complexes sans programmation. Ils sont capables d’apprendre à partir de l’expérience, d’extraire les caractéristiques essentielles à partir de données bruitées ([GTBS06]). Par exemple les réseaux neuronaux sont utilisés chez [DHH<sup>+</sup>11] pour faire du pronostic sur l’usure des systèmes de fraisage haute vitesse. [AGZ08] teste et compare différentes méthodes (en termes de précision de la prédiction, coût calculatoire, exigences liées à la mise en oeuvre) basées sur les réseaux neuronaux. [VW01] utilise les réseaux de neurones associés aux ondelettes pour prédire le RUL de roulements à billes avec une loi de vieillissement obtenue comme pour de la commande prédictive.

La logique floue est un moyen simple de conclure à partir d’une information d’entrée vague, am-



bigue, imprécise, bruitée, ou manquante ([GTBS06]). Les systèmes flous nécessitent des connaissances exprimées par des règles. Ils sont recommandés si l'information n'est pas quantitative mais que des règles de dépendance décrivent la propagation des défauts. Ils peuvent être ajustés automatiquement, et ne nécessitent pas de modèle physique. Ils permettent de traiter des imprécisions et des incertitudes, et autorisent le traitement de certaines incomplétudes. Par contre les réseaux flous n'ont pas de capacité d'apprendre, pas d'adaptation aux changements de l'environnement, et pas de méthode formelle pour l'ajustement de la base de connaissance créée. D'après [Vas08] la taille de la base d'apprentissage doit être supérieure plus de cinq fois au nombre de paramètres à optimiser.

Les réseaux neuro-flous (réseaux neuronaux associées à de la logique floue) constituent une classe de réseaux adaptatifs particulièrement appropriés pour supporter l'activité de prédiction : ils permettent de capturer la dynamique des systèmes réels sans qu'une phase de modélisation ne soit nécessaire. Ils sont par exemple utilisés chez [Kou10], [KGZ08], [AGZ08]. [CB09] utilise les réseaux neuro-flous pour pronostiquer deux défauts des machines électriques : une fissure dans un engrenage d'hélicoptère et un roulement défectueux. Le système neuro-flou est entraîné avec des données expérimentales de machines électriques pour servir de modèle de pronostic. La mise à jour des paramètres du modèle de la machine pour prendre en compte sa dynamique est faite à chaque nouvelle observation grâce à un réseau bayésien qui crée une fonction de densité de probabilité pour l'erreur entre la valeur réelle des résidus et la valeur calculée. L'avantage d'après l'auteur est de pouvoir gérer les non-linéarités et d'estimer l'état en temps réel.

L'approche Bayésienne est basée sur les réseaux bayésiens dynamiques, qui sont des graphes acycliques définis par un ensemble de nœuds avec des relations représentées au moyen de probabilités conditionnelles. Chaque nœud représente un mode de dégradation potentiel, et les probabilités de transition d'un état actuel aux états futurs possibles sont définies par apprentissage. Les probabilités a priori dans les réseaux Bayésiens doivent être introduites par l'expert, c'est une décision essentielle. La théorie des réseaux bayésiens est bien développée chez [Mul05] et chez [BOU12], qui montre la pertinence de son utilisation dans l'industrie du semi-conducteur. [WPJ04] utilise le réseau bayésien dynamique et les chaînes de Markov pour modéliser le vieillissement d'un système composé d'une pompe et d'une vanne.

Les modèles de régression prédictifs ont pour objectif d'approximer les séries temporelles correspondant aux indicateurs de dégradation. La tendance de chaque indicateur de dégradation est modélisée par une fonction polynômiale dont les coefficients sont établis par la méthode des moindres carrés récursifs.

[GP02] propose une méthode de pronostic basée sur le suivi d'un indicateur de l'état de santé (une combinaison d'observables) par rapport à un seuil de défaillance. Le pronostic peut être fait en temps réel. Des modèles paramétriques de la forme d'onde des vibrations pour différents défauts sont utilisés pour l'application sur un moteur diesel et plus particulièrement pour les défauts dans ses roulements à billes. L'auteur précise que l'utilisation d'une grande quantité de données en entrée entraîne des prédictions plus stables, mais moins sensibles aux changements récents. L'utilisation d'un plus petit ensemble de données (les plus récentes) mène à des prédictions plus variables mais plus sensibles aux conditions d'opération.

[BS04] base l'étude du diagnostic et du pronostic sur un modèle plus ou moins physique dont les paramètres sont estimés d'après des données réelles. Des outils de classification (réseaux de neurones, réseaux neuro-flous) servent à reconnaître la faute. L'état de santé présent est estimé

grâce au diagnostic. Pour la prédiction, la vitesse de changement d'état à l'instant courant est calculée et projetée dans le futur. L'application est un EMA de commande de vol. Le diagnostic est bien basé sur la connaissance physique mais le pronostic est juste une projection temporelle sur l'évolution des indicateurs, ce qui n'est pas physique et ne prend pas en compte l'environnement de l'équipement.

[CC10] propose une méthode basée sur l'estimation d'état. Les lois de vieillissement sont obtenues grâce à des essais. Elles ont la forme de modèles de Markov cachés hiérarchiques et sont représentées sous la forme de réseau bayésien (où un noeud représente un état de santé) pour faciliter une représentation compacte. Les auteurs se basent sur les probabilités de transitions dans le réseau pour caractériser le RUL. L'application présentée est la détérioration progressive de forêts de perceuses.

Dans [CB09] le but est de construire un indicateur de santé pour des outils, indépendant des opérations de l'outil. L'indicateur doit indiquer le niveau de performance de l'outil et servir de base pour la CBM. L'outil utilisé est la variance mobile généralisée. Le fait qu'elle soit mobile sert à minimiser l'effet des changements d'opération. Deux applications sont réalisées sur un outil de dépôt de vapeur, et sur un outil de dépôt de vapeur chimique assisté par plasma.

[Mul05] couple une représentation probabiliste de l'état d'un système (réseaux bayésiens) et une approche événementielle de surveillance de la dégradation. On a donc à la fois la connaissance a priori (basée sur l'expérience) et un suivi en ligne (guidé par les données). De plus la connaissance de la physique permet de connaître les relations causales pour modéliser les relations entre composants. L'application est réalisée sur un système mécanique automatisé de déroulage/pressage.

[LGP13] utilise une méthode guidée par les données pour étudier le vieillissement de turboréacteurs. L'indicateur est basé la température des gaz d'échappement (EGT). L'article présente une méthode algorithmique simple pour transformer les mesures successives d'EGT en un indicateur après chaque vol selon le temps d'utilisation.

Enfin, [VMOM<sup>+</sup>13] utilise toute une flotte navale pour regrouper des données et informations permettant d'enrichir la base de connaissance, tout en tenant compte de l'hétérogénéité et des similarités des unités de la flotte, du contexte opérationnel et des comportements afin d'établir un indice de santé global. Cette étude pourrait être appliquée à tout type de véhicule.

**Avantages** La force de cette méthode est sa capacité à transformer un ensemble conséquent de données bruitées en une plus petite somme d'informations pertinentes pour le diagnostic et le pronostic. Cette méthode est évolutive, puisqu'au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données il est possible de les incorporer dans la base de connaissance de la méthode. De plus cette approche ne nécessite pas de connaître les mécanismes de faute de l'équipement.

**Inconvénients** Le principal inconvénient de cette approche est que son efficacité est extrêmement dépendante de la quantité et de la qualité des données opérationnelles de l'équipement. Il faut connaître les scénarios de dégradation, car en cas de scénario inconnu le pronostic est aléatoire. Sans sélection préalable, la somme des données à stocker peut être rédhibitoire. Par exemple, un outil pouvant être utilisé dans cette méthode est les réseaux de neurones, qui reçoivent des données en entrée et apprennent à les classifier en fabriquant un modèle de type boîte noire qui renvoie en sortie l'état de santé du système. Si le modèle attendu n'est pas du tout

connu, face à une quantité de données trop importante le réseau de neurones risque d'apprendre des informations inutiles. Il peut créer un nombre trop grand de classes, ou des classes n'ayant aucune signification liée à l'état de santé. Il faut impérativement l'orienter en sélectionnant au préalable une base d'apprentissage pertinente et choisir quels sont les paramètres à surveiller.

De plus, les résultats obtenus par la méthode guidée par les données ne sont valables que pour une situation précise. Dès lors qu'une situation différente apparaît (équipement ou environnement différent), la légitimité de généraliser et d'appliquer les mêmes résultats ou de les extrapoler sans justification peut être discutée puisque l'indicateur n'a aucune signification physique.

### 1.4.2.3 Pronostic à base de modèles

Les méthodes de pronostic basées sur un modèle physique reposent sur une connaissance profonde de l'équipement à pronostiquer. Elles supposent que l'on dispose d'un modèle analytique décrivant le comportement de l'équipement et de son vieillissement au cours du temps.

**Principe** Le principe est, à partir de l'état présent de l'équipement et des conditions opérationnelles, de simuler son vieillissement grâce à des modèles, et d'en déduire l'évolution future de son état de santé. Il est présenté sur la figure 1.8. La loi de vieillissement est physique : elle représente l'évolution future d'un paramètre physique de l'équipement en fonction des conditions d'opération.

Cette méthode est moins souvent utilisée que les autres, du fait de sa haute exigence en connaissances d'entrée, cependant nous la retrouvons chez [ORCA12], [RD11], [DG11] et [BDR12]. [GD11] étudie le pronostic des systèmes non-linéaires à base de modèles et applique ses résultats liés aux observateurs sur un oscillateur électromécanique. [LNP<sup>+</sup>03] présente également une méthode de pronostic basée sur les modèles, appliquée à un système de suspension automatique.

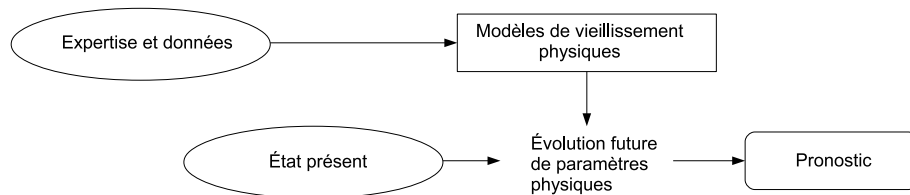


FIGURE 1.8 – Principe de la méthode de pronostic à base de modèles

**Techniques** Les modèles peuvent être de différentes natures :

- modèles analytiques basés sur des lois physiques. Peu de ces modèles sont connus pour l'instant ;
- modèles d'identification. Dans le cas de systèmes complexes, il est souvent impossible d'établir un modèle prenant en compte tous les processus physiques mis en jeu. Il est alors possible de présumer d'une certaine forme pour le modèle dynamique et d'utiliser les observations pour déterminer les paramètres du modèle.

[CC04] propose une méthode de pronostic à base de modèle pour déterminer l'état de santé d'une batterie connectée à un système électromécanique. Le modèle dynamique rapide (observable) est couplé au modèle de vieillissement lent (caché). La forme de la loi de vieillissement est supposée connue par l'expérience alors que le modèle dynamique n'est pas parfaitement connu.

[HS03] propose un modèle probabiliste de la physique de la défaillance. De nombreuses simulations (Monte Carlo) sont faites en faisant varier les paramètres d'un modèle physique de dégradation pour avoir plusieurs dates de défaillance. Ensuite ces valeurs obtenues sont représentées sous la forme d'une courbe statistique de forme Weibull dont les paramètres sont choisis pour correspondre aux résultats de simulation. Les modèles physiques utilisés sont le modèle Eyring-Peck (EP) pour la corrosion de circuits imprimés, une loi de puissance d'augmentation de la corrosion qui représente la détérioration progressive des oléoducs et gazoducs, et un modèle aléatoire de défaillance mécanique par charge dynamique.

Le Health Monitoring est aussi souvent présenté comme une perspective intéressante à des travaux de modélisation. Par exemple [BEJ05] envisage de se baser sur les signatures des courants d'une machine pour classifier les paramètres de la machine avec un réseau de neurones. Les données d'apprentissage sont obtenues à partir d'un modèle de simulation. La justesse des prédictions est directement fonction de la validité des données simulées, le coeur de l'étude est la validation du modèle grâce à des données enregistrées en service.

[Ray99] construit un modèle stochastique d'une fissure dans un matériau métallique (structure ou carter par exemple). L'équation est basée sur la physique et validée par une analyse de données d'essai. La PDF non stationnaire est générée, elle dépend de l'instant d'initiation de la fissure et de sa taille actuelle (pour en déduire la vitesse à laquelle la fissure augmente).

Dans ses travaux [GD11] présente un pronostic à base de modèles, les modèles étant sous forme d'équations différentielles, plus précisément de systèmes non linéaires à échelle de temps multiple (rapide pour le comportement du système, lent pour la dégradation). Il compare trois observateurs à entrées inconnues sur un exemple de système linéaire, à grand gain, à mode glissant. L'exemple est une application académique illustrative d'un oscillateur électromécanique dont les modèles dynamique et de dégradation sont connus. Le but est d'estimer l'état à dynamique rapide grâce à l'observateur à entrée inconnue, puis de déterminer la dynamique lente et ses paramètres (problème de reconstruction d'entrée inconnue en temps fini et de dérivation numérique).

Enfin, [KKB<sup>+</sup>13] étudie le vieillissement de condensateurs électrolytiques grâce à un modèle physique non linéaire complexe. L'utilisation du filtrage particulière permet d'estimer les paramètres du modèle de dégradation. Une étude expérimentale est menée sur 15 condensateurs anormalement stressés en température.

**Avantages** La méthode basée sur les modèles physiques est celle qui donne les résultats les plus précis. La connaissance physique est directement intégrée à la méthode : une faute dans l'équipement se traduit généralement par le changement d'un paramètre dans le modèle, ce paramètre ayant une signification physique. Cela permet de bien comprendre le mécanisme de faute. De plus, le modèle physique de vieillissement est évolutif : il est enrichi avec l'acquisition de nouvelles connaissances sur les phénomènes de dégradation.

L'intérêt de la simulation est aussi qu'il n'y a pas de destruction ou de détérioration de l'équipement lors de l'étude des dégradations. De plus toutes les variables du système sont accessibles, ce qui permet de choisir virtuellement et sans coût de capteurs un indicateur pertinent parmi toutes les possibilités. Les résultats sont plus précis que pour les approches basées sur l'expérience ou guidées par les données : au-delà de la durée de vie, cette méthode permet une bonne compréhension des mécanismes de faute et une évaluation en temps réel des différents endommagements.

Un autre avantage est qu'avec les modèles physiques l'utilisateur maîtrise ce sur quoi il travaille. Il peut évaluer les approximations et les incertitudes contrairement aux modèles cachés des méthodes de l'intelligence artificielle.

**Inconvénients** La difficulté majeure de cette technique repose dans l'élaboration du modèle. Les systèmes réels voient leur complexité augmenter, leur comportement est souvent non-linéaire, ce qui complexifie la phase de modélisation. De plus, les modes de faute sont multiples. Comprendre tous les mécanismes physiques en jeu lors du vieillissement et leurs interactions dans un système complexe est difficile. Les phénomènes de dégradation sont en partie aléatoires et soumis à des facteurs influents dont il est difficile de tenir compte de manière exhaustive. Les modèles ne sont pas toujours généralisables. Les résultats sont évidemment limités par la précision du modèle, notamment par les incertitudes sur les paramètres et par la puissance de l'outil de simulation.

#### 1.4.2.4 Choix de la méthode adaptée à notre application

Pour choisir parmi ces méthodes laquelle est la plus adaptée à notre application d'ensemble moto-pompe d'un EHA, pesons le pour et le contre des différentes méthodes et évaluons nos exigences sur l'information de sortie du modèle de pronostic.

Dans l'aéronautique, les équipements sont généralement très fiables. De plus les équipements que nous considérons sont innovants. On a donc peu de données de défaillance. De plus la stratégie pour les équipements importants est généralement de réaliser une maintenance préventive : la pièce est changée avant la faute. On peut donc savoir combien de temps la pièce a tenu, mais on ne sait pas combien de temps elle aurait encore tenu si elle n'avait pas été remplacée : l'information est tronquée. Ces connaissances lorsqu'elles existent sont la propriété des avionneurs et l'équipementier n'y a pas forcément accès. L'historique de défaillance est donc très pauvre.

Même si une observation de l'équipement est réalisée via des capteurs, les données ne sont pas forcément enregistrées pour tout le(s) vol(s), et le cas échéant l'enregistrement n'est toujours pas la propriété de l'équipementier. Un autre moyen d'obtenir des données de défaillance est de réaliser des essais, cependant de tels essais sont longs à mettre en place et à réaliser, destructifs voire dangereux, et très coûteux. La base de données sur les défaillances est donc plutôt pauvre.

En revanche, les équipements sont souvent conçus à partir de modèles, nous avons donc accès facilement aux modèles de comportement nominaux.

Si l'on considère maintenant la sortie attendue du module de pronostic, les informations utiles sont bien sûr la durée de vie restante de l'équipement, mais aussi l'évolution progressive des dégradations qui permet au mieux la localisation et l'identification de la faute, pour une anticipation optimale sur l'instant de fin de vie.

Outre les entrées et sorties du module de pronostic, nous avons d'autres exigences sur l'approche utilisée. Nous souhaitons avoir une approche de pronostic générique, car beaucoup d'équipements sont très semblables sans être identiques. Par exemple pour les moteurs, nous avons des moteurs avec un nombre d'aimants et de bobines qui varie selon l'application (suivant le couple et la vitesse nécessaires par exemple). Si l'on observe uniquement les données observées, elles seront différentes d'un moteur à l'autre, ne serait-ce que d'un point de vue fréquentiel. En revanche, avec

une approche basée modèle, un modèle générique peut être construit et s'adapter aux différentes typologies de moteur sans repartir de zéro. Une fois que la méthode a été bien développée pour un équipement, il y a seulement une adaptation à faire pour des équipements similaires, par exemple le changement de valeurs de paramètres, ou de la forme du modèle. Au contraire, pour les méthodes basées sur l'expérience ou les données, le moindre changement de l'équipement entraînera la nécessité de tout recommencer dès l'acquisition de la base de retour d'expériences ou de données.

L'idéal est de pouvoir estimer et quantifier les incertitudes sur la connaissance de l'équipement et de son vieillissement, afin d'organiser les opérations de maintenance avec une certaine confiance dans le résultat du module de Health-Monitoring (nous revenons sur ce concept dans la partie 3.4.1). Il est possible d'estimer les incertitudes avec l'approche à base de modèles, mais c'est plus compliqué avec les deux autres méthodes qui proposent des modèles cachés, car les relations entre l'entrée et la sortie du modèle de pronostic sont mal connues.

Nous souhaitons également que l'approche soit évolutive, et qu'elle permette d'intégrer de nouvelles connaissances au fur et à mesure. Les méthodes de type retour d'expérience et guidé par les données ont une base de données figée, même si elle peut s'enrichir. La méthode à base de modèles est plus facilement évolutive.

Il est aussi très important que l'approche permette de prendre en compte la connaissance sur l'environnement. En effet, deux environnements différents peuvent mener à des durées de vie très différentes. Par exemple, un composant sensible à de fortes températures n'aura pas la même durée de vie s'il est implémenté sur un avion qui vole à Oslo ou à Abu Dhabi. Pour les méthodes basées sur l'expérience ou les données, cela demande de différencier la base de connaissance en fonction de l'environnement, c'est compliqué et la base de connaissance est d'autant plus réduite qu'elle est divisée. Par contre il est possible de représenter l'environnement en entrée dans les modèles.

Les méthodes de pronostic sont généralement représentées sous forme de pyramide ([Lle08], [Rib09]) comme sur la figure 1.9, ce qui permet de représenter verticalement la complexité de la méthode et horizontalement le domaine d'application de chaque méthode (très réduite pour le pronostic à base de modèle, très large pour le pronostic basé sur des méthodes statistiques).

Suite aux arguments énoncés dans ce paragraphe, une nouvelle manière de représenter les méthodes de pronostic est proposée sur la figure 1.9. On voit que les différences au niveau du champ d'application sont moins marquées que pour la représentation classique, mais aussi que les informations apportées par chaque méthode ne sont pas toujours aussi riches. La méthode basée sur l'expérience apporte des connaissances sur la durée de vie résiduelle. La méthode guidée par les données rajoute le concept d'endommagement, qui permet de déterminer l'avancement des dégradations. Enfin le pronostic à base de modèles physiques rajoute de la connaissance sur le mécanisme de panne en jeu, ce qui permet de comprendre parfaitement la manière dont l'équipement est en train de vieillir.

Au vu de la comparaison des trois approches de pronostic, du contexte industriel et des attentes en sortie du pronostic, la méthode à base de modèles nous semble être la solution à préférer pour notre application. Les deux principaux arguments sont qu'elle apporte une précision sur la physique du mécanisme de faute, et sa généralité est bien plus grande que pour les autres approches du pronostic.

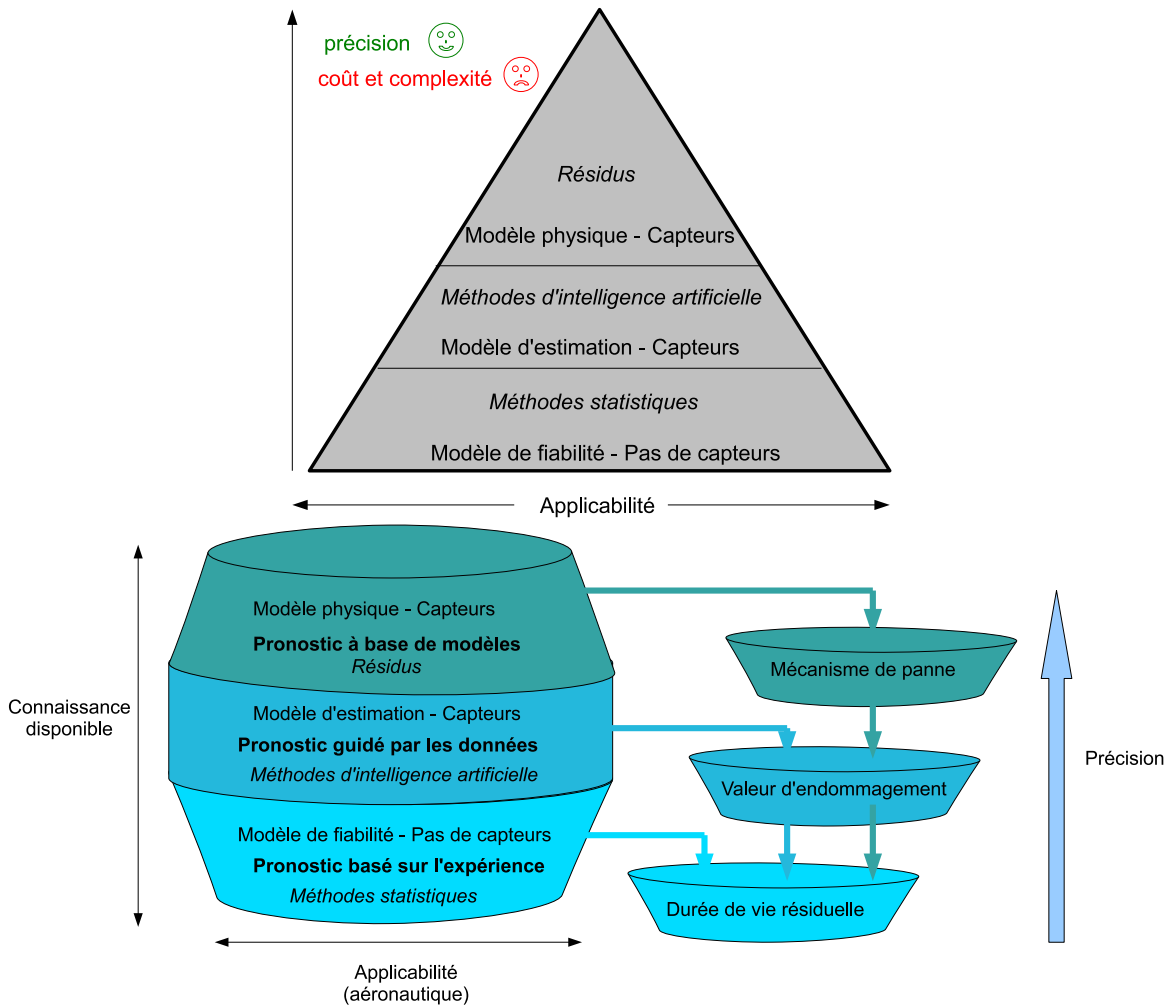


FIGURE 1.9 – Représentation classique des méthodes de pronostic sous forme d’une pyramide (inspiré de [Rib09]) en haut. Proposition de représentation des méthodes de pronostic sous une forme que nous pensons bien adaptée aux connaissances disponibles en aéronautique en bas.

### 1.4.3 Les lois de vieillissement

Nous avons vu que dans le cas des méthodes basées sur les modèles physiques et dans le cas des modèles basés sur les modèles statistiques, des modèles de vieillissement sont utilisés. Ces modèles de vieillissement sont constitués de lois de vieillissement, chaque loi représentant une des manières possibles pour le système de vieillir. Les lois peuvent donc être :

- statistiques : temps restant avant la défaillance (RUL), probabilité de survie ou risque de défaillance à un instant futur ;
- basées sur les données : projection temporelle de la tendance d’indicateurs de dégradation sans signification physique, jusqu’au RUL ;
- physiques : projection temporelle de la valeur de paramètres physiques, jusqu’au RUL ou aux seuils de dégradation ou de faute ;
- ou encore combinaison de plusieurs des méthodes pré-citées : par exemple une loi statistique dont les paramètres sont choisis grâce à des lois physiques ou grâce à des résultats d’essais.

Afin de déterminer de manière précise l'état futur d'un système, il est opportun que la loi de vieillissement tienne compte du stress qui influence réellement le système tout au long de sa vie.

### 1.4.3.1 Représentation générale du taux de défaillance au cours du temps

Le taux de défaillance des systèmes est usuellement représentée sous la forme d'une courbe en baignoire (voir la figure 1.10). C'est le taux d'équipements arrivés en fin de vie utile à un certain instant. Cette courbe théorique décrit le taux de défaillance en fonction des étapes de la vie d'un composant, qui sont :

- la jeunesse avec un taux de défaillance décroissant, c'est la phase dite de rodage, où meurent les équipements ayant un défaut de fabrication
- la vie utile avec un taux de défaillance constant dans le temps, où les défaillances ne sont pas dues à un processus de vieillissement progressif mais sont aléatoires et brutales. Dans cette période le taux d'avarie est souhaité le plus bas possible. Lorsque le taux de défaillance est constant, on parle de défaillance sans vieillissement, le taux de défaillance ne dépend pas de la vie passée de l'équipement.
- le vieillissement où le taux de défaillance augmente dans le temps, à cause de mécanismes d'endommagement progressifs (par exemple l'usure). Le taux de défaillance est fonction de l'âge : plus l'équipement est vieux, plus le taux de défaillance augmente.

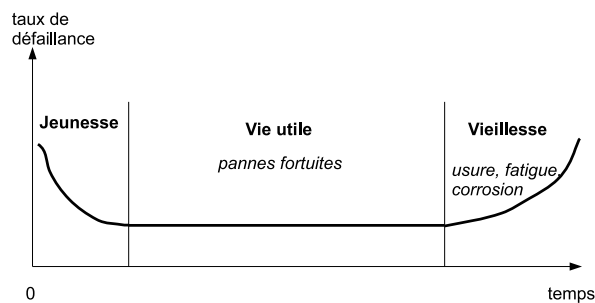


FIGURE 1.10 – Courbe baignoire représentant l'évolution du taux de défaillance durant la vie d'un composant.

La forme de la courbe dépend des équipements considérés, et de la période de leur vie où ils se trouvent. En général, et c'est d'autant plus vrai dans l'aéronautique, la première partie de la courbe est très courte voire inexistante car la qualité des produits est vérifiée en sortie de fabrication et les pièces pouvant connaître une mort prématurée sont directement éliminées avant la mise en service.

Pour les composants mécaniques, la deuxième phase est également très courte puisque les mécanismes d'usure, d'érosion, etc. se mettent en place dès le début de la vie du composant. On a donc une loi avec un taux de défaillance croissant.

Pour les composants électroniques, c'est la troisième phase qui est très courte, en général la mort du composant survient lors de la deuxième phase avec des pannes brutales, qui ne dépendent pas de la vie passée du composant. On a donc une loi avec un taux de défaillance constant.

Une étude des lois de vieillissement est rapidement présentée ici, et bien développée en annexe 1. Elles sont divisées en plusieurs catégories suivant leurs natures.



### 1.4.3.2 Cas où la loi de vieillissement est statistique

Dans ce cas, la loi de vieillissement physique n'est pas connue, mais des informations provenant de retours d'expérience et d'essais sont disponibles. Les lois statistiques basées sur un grand nombre d'expériences permettent de définir la durée de vie, ou plus rarement la probabilité d'avoir une certaine valeur d'endommagement dans le futur. Les lois de vieillissement statistiques sont les plus nombreuses dans la littérature. Plusieurs lois seront présentées ici.

Dans la loi Gaussienne, le taux de défaillance est croissant avec le temps, cette loi représente bien la fin de vie des dispositifs subissant un phénomène de vieillissement progressif. On sait que lorsqu'une variable suit une loi Gaussienne, alors 99.7% des occurrences se font dans l'intervalle temporel  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ , ce qui peut permettre de déterminer un intervalle temporel  $[t_{min}, t_{max}]$  qui contient l'instant de franchissement du seuil.

La loi Lognormale est souvent représentative des défaillances par fatigue en mécanique.

La loi exponentielle dépend d'un unique paramètre, le taux de défaillance, constant. Elle représente les lois sans usure (pannes non progressives mais abruptes) de la deuxième partie de la courbe baignoire (voir la figure 1.10). Elle est très utilisée pour représenter la durée de vie des circuits électroniques.

La loi de Weibull est une loi très souple représentative d'une grande variété de phénomènes aléatoires. Elle est souvent utilisée dans le domaine de la fiabilité des composants mécaniques et électroniques. En particulier elle généralise la loi exponentielle car elle peut modéliser un taux de défaillance variant dans le temps. Elle permet donc de représenter les trois phases de la durée de vie d'un matériel (prédiode infantile, vie utile, période d'usure ou de vieillissement). [Buf09] dit qu'elle peut représenter des mécanismes de vieillissement de type corrosion ou fatigue, ou encore un mécanisme d'usure, suivant les valeurs de ses paramètres.

La loi Gamma permet de représenter des processus d'évolution monotones. La loi Gamma est utilisée dans de nombreux domaines pour des pannes progressives : [vNKP00] a utilisé un modèle de dégradation basé sur la loi gamma pour représenter l'érosion d'une digue maritime au cours du temps, cette même loi a été utilisée par [Law04] pour représenter l'évolution de la taille d'une fissure dans un matériau, ou encore [FZA10] l'utilise pour modéliser la dégradation du fil de contact caténaire dans le temps. [LD09] dit que pour des systèmes soumis à des chocs intermittents sans évolution de la dégradation entre deux chocs consécutifs, le modèle Gamma est bien adapté.

D'autres lois existent et sont référencées en annexe 1 : la loi Beta, la loi binomiale, la loi de Poisson.

Il est possible d'utiliser plusieurs lois de manière simultanée. [HCBB12] combinent deux lois ce qui permet de modéliser à la fois la dégradation via une loi Gamma, et à la fois des pannes abruptes via un processus de Poisson. Pour représenter le fait que les pannes abruptes arrivent plus souvent lorsque la dégradation est à un stade avancé, l'intensité du processus de Poisson augmente avec le temps et avec le niveau de dégradation atteint (suivant si ce niveau est inférieur ou supérieur à un seuil fixé).

**Choix de la forme de la loi et détermination des paramètres** La loi de Weibull permet de représenter les trois phases de la vie d'un composant, mais elle est difficile à paramétrer du fait de la présence de trois paramètres. La loi exponentielle est plus simple (un paramètre unique) et permet de représenter les défaillances brutales. Pour les défaillances progressives, la loi Gaussienne semble bien adaptée, d'autant plus qu'elle permet de représenter la probabilité de défaillance sur un intervalle de temps borné. Pour choisir la loi statistique la mieux adaptée, il est possible d'essayer de faire correspondre plusieurs lois aux données de retour d'expérience, puis de choisir la loi s'ajustant le mieux aux données.

### 1.4.3.3 Cas où la loi de vieillissement est physique

La loi de vieillissement physique peut être déterminée de deux manières :

- grâce à des lois analytiques ;
- grâce à des essais réalisés dans des conditions bien maîtrisées avec mesure de paramètres caractéristiques. La forme de la loi de vieillissement est choisie par les experts et les paramètres de la loi de vieillissement sont identifiés à partir des résultats d'essai (cela suppose que l'évolution de l'endommagement soit mesurable en essai).

Peu de lois de vieillissement physiques sont recensées car les phénomènes d'endommagement et de dégradation sont souvent très complexes. On peut séparer les lois dont la sortie est

- une durée de vie ;
- une valeur d'endommagement ;
- un taux de défaillance.

Plusieurs lois sont résumées ici et détaillées en annexe 1 pour illustrer ces catégories.

**Lois dont la sortie est une durée de vie** Le modèle d'Arrhénius est une loi physique qui traduit l'influence de la température sur la durée de vie d'un circuit électronique ou d'un composant dont le processus de dégradation est chimique. [Ven07] l'utilise par exemple pour modéliser le vieillissement de condensateurs à électrolyte liquides par évaporation de l'électrolyte. On la retrouve également pour des composants de type di-électriques, semi-conducteur, batterie, lubrifiant et graisse, plastique et filaments de lampes incandescentes.

Le modèle de puissance inverse est une loi qui peut être physique, et qui traduit l'impact d'un facteur d'endommagement sur la durée de vie du composant (par exemple, effet de la tension sur une électronique). On le retrouve pour des di-électriques, des roulements à billes ou rouleaux, des composants optoélectroniques, des composants mécaniques soumis à la fatigue. Un cas particulier de ce modèle est la loi Coffin Manson qui donne le nombre de cycles moyens à la rupture de pièces soumises à la fatigue connaissant des variations de température ou des chocs thermiques.

Le modèle d'Eyring généralisé améliore le modèle d'Arrhénius car il prend en compte d'autres facteurs d'endommagement que la température, comme la tension ou n'importe quel autre stress. On le retrouve par exemple pour modéliser le vieillissement de composants électroniques, de conducteurs aluminium, de composants mécaniques soumis à la rupture.

**Lois dont la sortie est un endommagement** La loi de Paris est citée dans de nombreux ouvrages dont [Pom10]. Elle représente l'évolution d'une fissure en fonction du nombre de cycles.

La loi de Miner est utilisée pour modéliser l'accumulation linéaire des dommages dus à la fatigue. Elle est valide pour les métaux, seulement jusqu'à la limite d'élasticité.

La courbe de Wölher présente le nombre de cycles conduisant à un endommagement en fonction d'un paramètre caractéristique d'un cycle, par exemple un maximum de contrainte.

**Lois dont la sortie est un taux de défaillance** La norme MIL-HDBK-217 est un documentaire militaire américain connu et accepté dans le monde entier, qui donne le calcul du taux de défaillance pour des composants tels que transistors, résistances...

La loi Belvoir Research Development & Engineering permet d'évaluer par exemple le taux de défaillance  $df^i$  d'un joint.

Le modèle de Cox est principalement utilisé dans le domaine de la médecine et de la maintenance pour étudier l'influence de différentes variables intervenant dans le processus de dégradation sur différents sujets. L'expression mathématique de ce modèle se base sur la fonction de risque de défaillance ([LD09]). Une hypothèse forte est faite : l'influence des contraintes sur le risque instantané de défaillance est indépendante du temps (c'est l'hypothèse de risque proportionnel). D'un point de vue mathématique, il est possible d'inclure des variables qui dépendent du temps, mais alors l'interprétation des coefficients est plus délicate. Le modèle de Cox est une loi physique où les variables d'influence seraient les facteurs d'endommagement, et l'évolution du risque de faute serait étroitement liée à l'évolution de l'endommagement.

#### 1.4.3.4 Cas où la loi de vieillissement est basée sur les données

Dans le cas où la loi de vieillissement est basée sur les données, l'indicateur de dégradation suit une loi similaire aux lois physiques, dont la forme et les paramètres sont déterminés par identification.

Dans ce cas là, le modèle est caché, on ne connaît ni sa forme, ni ses paramètres, on n'a pas accès aux relations entre les entrées et les sorties du modèle. On ne connaît que l'outil qui a permis de créer le modèle : réseau de neurones, logique floue, réseaux bayésiens, ou autre.

On ne présente donc pas dans ce paragraphe de loi de vieillissement guidée par les données, car on ne peut pas les détailler d'avantage que les nombreux exemples que nous avons donnés dans la section 1.4.2.2.

#### 1.4.3.5 Cas où la loi de vieillissement est à la fois statistique et physique

Dans ce cas la loi est statistique, mais à la différence des autres lois statistiques elle prend également en compte les stress via l'un au moins de ses paramètres, la loi a donc une composante physique. Cela permet d'adapter la loi statistique moyenne à l'environnement du composant. Mathématiquement, c'est possible quelle que soit la loi statistique choisie, mais la difficulté réside dans l'affectation d'une loi de vieillissement physique à un ou plusieurs des paramètres de la loi statistique. Des exemples sont montrés dans [BLCL07], [NLM<sup>+</sup>09], [GEP09], [BRG02], et présentés en annexe 1.

### 1.4.3.6 Synthèse des lois de vieillissement

Nous avons fait un effort de synthèse pour construire le tableau 6.1 en annexe 1 qui nous permet d'avoir une vue globale de l'ensemble de lois de vieillissement connues, et de pouvoir choisir la mieux adaptée pour une application donnée en fonction de plusieurs critères. Le premier critère est la nature de la faute, abrupte ou progressive. Un autre critère est la connaissance acquise sur l'équipement et la faute : est-ce que la connaissance est plutôt physique ou provient de retours d'expérience (loi physique ou statistique), à quelle complexité de loi de vieillissement peut-on prétendre (nombre de paramètres). Enfin on peut également choisir la loi en fonction du nombre de facteurs d'endommagement que l'on veut considérer, et bien sûr de la forme de la sortie souhaitée (durée de vie, évolution de l'endommagement dans le temps, probabilité de survie). Enfin, la colonne application éclaire sur ce qui a été pensé voire implémenté virtuellement ou expérimentalement.

Plus le modèle de vieillissement est correct (précis, détaillé), meilleurs sont les résultats du module de pronostic, mais plus les connaissances à avoir seront nombreuses.

### 1.4.3.7 Données d'entrée des lois de vieillissement

Lorsque l'on parle de connaissance sur le vieillissement du système pour choisir la méthode de pronostic à adapter, on parle en fait de deux sources de connaissances : l'expertise et les données.

Les personnes ayant travaillé plusieurs années avec un équipement ont collecté beaucoup d'informations sur celui-ci. Cette connaissance basée sur l'expertise est très importante, car elle apporte notamment une vue globale et une bonne compréhension des phénomènes de dégradation. Cette forme de connaissance est complémentaire de celle obtenue via les données.

Les industriels disposent généralement d'un vaste historique concernant les systèmes ou les processus. Les données utilisées proviennent soit d'essais en laboratoire soit de résultats d'exploitation (bases de données disponibles, retours d'expérience, enregistrements de la maintenance, etc.). La connaissance provenant des données comprend :

- les signaux enregistrés sur l'équipement ou sur l'environnement soit durant la vie de l'équipement, soit en essais ;
- l'historique des pannes et des opérations de maintenance.

Souvent, les résultats d'exploitation sont trop peu nombreux et surtout trop peu exploitables pour des analyses de fiabilité. En effet, lorsque le matériel considéré est innovant ou très fiable, ce qui est le cas dans l'aéronautique, ou alors présent en très faible quantité, les défaillances constituent des événements rares, qui peuvent ne jamais arriver et sur lesquels on n'aura donc aucun retour. Cela justifie l'approche à base de modèles.

Des enregistrements réalisés à des moments où l'on a une augmentation des dégradations sont nécessaires pour choisir les indicateurs de dégradation, et quantifier l'impact des dégradations sur les indicateurs choisis. Cependant la plupart des enregistrements faits durant la vie opérationnelle des équipements ne contiennent pas de dégradations ou de pannes. Typiquement, dans l'aéronautique, les pannes d'un système spécifique ont une occurrence de moins de  $10^{-6}$  par heure de vol. Cela signifie que  $3,7 \cdot 10^7$  heures d'opération seraient nécessaires pour avoir des modes de panne spécifiques au moins 30 fois avec une probabilité de 90%. Des fichiers de données de cette taille avec tous les enregistrements nécessaires ne sont pas forcément disponibles. Alors des essais

et des simulations peuvent remplacer les données manquantes de dégradation et de panne.

La figure 1.11 montre quelle méthode de pronostic est recommandée en fonction des données disponibles sur le vieillissement de l'équipement.

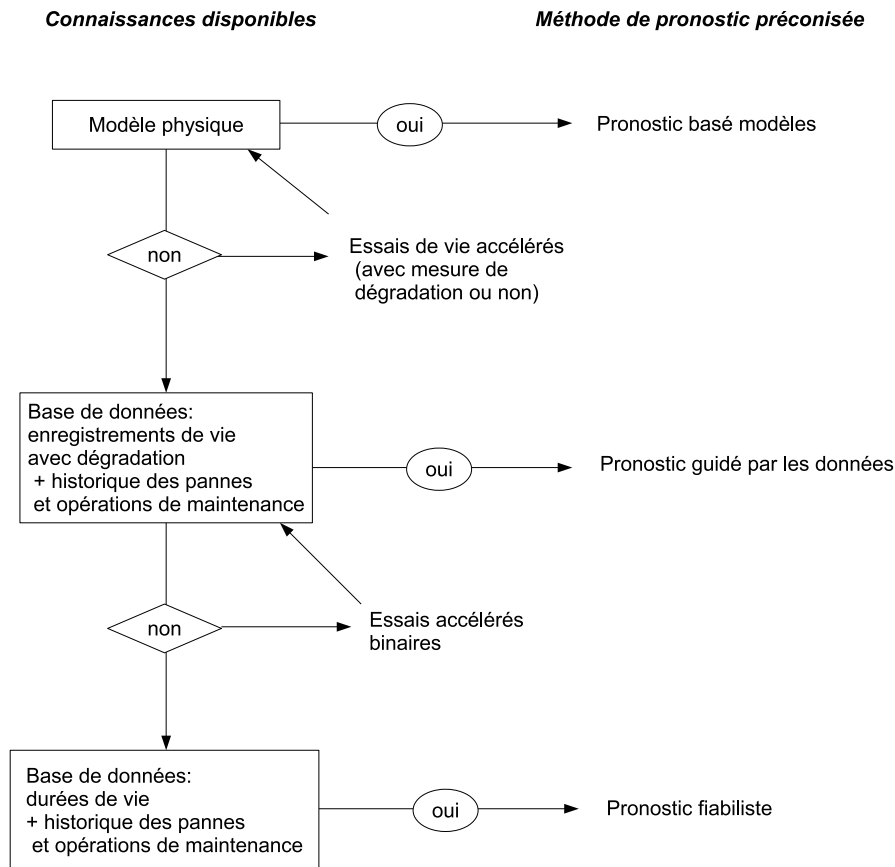


FIGURE 1.11 – Préconisation de méthode de pronostic en fonction des données disponibles

#### 1.4.4 Incertitudes et confiance dans la prédiction

On retrouve quasiment toujours, comme dans [DGD<sup>+</sup>09], la notion que le pronostic consiste en deux activités : la prédiction du futur, et une évaluation de cette prédiction sous forme d'indice de confiance.

Les suppositions et les simplifications sont inévitables dans le processus de prédiction. Représenter et gérer les incertitudes inhérentes aux prédictions est l'un des plus gros challenges liés aux prédictions (c'est déjà le cas par exemple pour les incertitudes liées aux projections climatiques).

L'incertitude liée au pronostic découle du cumul de plusieurs incertitudes :

- sur les " outils " :
  - sur la structure et les paramètres des modèles, à cause de simplifications, de linéarisations, de paramètres inaccessibles, de la variabilité au sein d'un groupe d'équipements identiques, des stress et influences opérationnels et environnementaux qui fluctuent stochastiquement ;
  - sur la structure et les paramètres des lois de vieillissement (pour les mêmes raisons) ;
  - sur les algorithmes, qui peuvent être faux ou incomplets ;

- sur les perturbations qui risquent de ne pas être toutes prises en compte ;
- sur les entrées du pronostic qui sont :
  - les mesures, qui comportent un risque d'erreur ou de bruit ;
  - le diagnostic qui peut être imprécis ou même faux.

Les incertitudes sont divisées en deux classes : les irréductibles aléatoires, dues à la variabilité physique ; les réductibles, dues aux manques de connaissance sur le comportement du système et sur la loi de vieillissement ([HS03]).

Nous réalisons une étude bibliographique pour observer la manière dont les auteurs traitent les incertitudes dans le pronostic.

Tout d'abord il est à noter que les outils de type réseau de neurones ou systèmes flous gèrent les incertitudes de par leur principe même de fonctionnement.

Pour gérer l'incertitude, en général un intervalle dit de confiance est établi autour de la prédiction : il y a 95% de chance pour que l'instant de faute soit bien dans l'intervalle. Chez plusieurs auteurs comme [ZKX<sup>+</sup>07] et [TDK<sup>+</sup>10], les incertitudes sont prises en compte via la représentation de la prédiction sous forme de distribution de probabilité sur un intervalle. Il arrive aussi que les incertitudes sur les résultats soient reflétées par un indice de confiance dans la prédiction, comme dans [BS04]. [SCB<sup>+</sup>01] considère que l'indice de confiance est corrélé au fait que le résultat obtenu est exact, c'est-à-dire que l'intervalle proposé contient bien le vrai instant de faute. De manière très similaire [DGD<sup>+</sup>09] définit l'indice de confiance comme le degré de certitude sur la prédiction, c'est-à-dire là-encore un degré qui quantifie le fait que l'on soit sûr que le résultat obtenu est exact. Pour [Vas08] la confiance est également le degré de certitude sur le temps prévu jusqu'à la défaillance. Le taux de confiance est représenté par l'aspect probabiliste des prédictions dans ([GD11]). Dans [LNP<sup>+</sup>03], l'incertitude est opposée à la précision de la prédiction, qui est liée à la taille de l'intervalle de valeurs prédites : l'intervalle est d'autant plus grand que les incertitudes sont grandes. Pour [MCP<sup>+</sup>01], une confiance de 90% implique que la probabilité que l'instant de défaillance se produise dans l'intervalle estimé est de 0.9. D'après [EGBH00] l'incertitude sur la prédiction diminue au fur et à mesure que la durée de vie restante diminue. Il définit la confiance comme la probabilité que l'instant réel de faute appartienne à l'intervalle prédit.

[HS03] gère les incertitudes en représentant le résultat sous la forme d'une fonction de densité de probabilité, créée grâce à des simulations de Monte Carlo. Les paramètres de Weibull obtenus dépendent fortement des incertitudes sur les paramètres d'entrée. S'il n'y pas d'incertitude, le paramètre de forme  $\beta$  est infini, et une valeur unique pour l'instant de défaillance  $t_{RUL}$  est prédite. S'il y a beaucoup d'incertitudes sur les paramètres d'entrée, alors il y a beaucoup de possibilités pour le  $t_{RUL}$ . Si le modèle est aléatoire, alors  $\beta$  est proche de 1 pour tous les degrés d'incertitude, l'incertitude ne joue plus un grand rôle. L'objectif des travaux est d'obtenir un lien causal entre la nature de la distribution des paramètres d'entrée et les conséquences sur la nature de la distribution des  $t_{RUL}$ .

Dans [CC10] le RUL est présenté sous forme de distribution de probabilité pour représenter les incertitudes. Pour établir la valeur de la confiance, ils prennent l'ensemble des résultats, soit un certain nombre de valeurs de RUL trouvées en simulation. Si la confiance doit être de 80%, ils enlèvent 20% des valeurs (en choisissant les valeurs extrêmes), et ils donnent l'intervalle restant dans lequel se trouve le RUL avec une confiance de 80%. Le seuil de confiance doit être établi dès le départ, et le résultat donné par le pronostic sera celui qui correspond à ce seuil de confiance.

A niveau de confiance donné, le plus étroit est l'intervalle prédit, plus grande est la prédiction et plus utile est l'estimation.

Pour [Mul05] un résultat numérique exact n'a pas de signification s'il n'est pas encadré par un intervalle de confiance. Si la propagation des incertitudes est difficile à traiter de manière analytique le recours à des outils de calculs numériques (type Monte Carlo) devient nécessaire.

Une autre manière de gérer les incertitudes se retrouve dans [GD11] et son approche à base de modèles. Il utilise un vecteur de paramètres incertains et pose l'hypothèse que les incertitudes et les perturbations sont bornées. Il en déduit deux modèles possibles pour l'état de la dégradation : une borne inférieure et une borne supérieure. En découlent une borne inférieure et une borne supérieure pour la valeur de  $t_{RUL}$ .

La confiance est également étudiée par [Vas08] à travers deux théories. La théorie des probabilistes ne qualifie pas la confiance ou l'incertitude, mais la vraisemblance relative des différentes propositions. Si l'on veut faire le lien avec les incertitudes on dira qu'une probabilité de 0% sur la prédiction représente le fait qu'elle soit impossible, alors qu'une probabilité de 100% représente une certitude. Pour la théorie des possibilités, on a une situation de référence et une situation donnée. On y associe un degré de possibilité, mais aussi un degré de nécessité, qui complète la possibilité en indiquant le degré avec lequel l'information est certaine. Si la possibilité n'est pas 100%, alors la nécessité est forcément 0. Le degré de nécessité est alors un degré de certitude lorsque la possibilité est de 100%.

Nous remarquons qu'il n'y a pas vraiment de consensus sur le vocabulaire (confiance, incertitudes, ...). Dans notre cas, pour gérer une partie des incertitudes, conformément à ce qui est fait couramment, nous choisissons de représenter la prédiction sous la forme d'un intervalle de temps dans lequel se trouve l'instant futur de la prochaine faute ou défaillance de l'équipement. Nous pensons que ceci est à la fois réaliste et simple. Il est difficile de caractériser trop finement la date d'occurrence d'une faute ou d'une défaillance, donc donner le résultat sous forme d'un intervalle de valeurs nous semble être un bon compromis. De plus la taille de l'intervalle donne des indications sur les connaissances disponibles. Lorsque l'on n'a aucune information sur le vieillissement d'un équipement, l'intervalle de temps initial renvoyé par le pronostic pour le RUL est  $[0 ; +\infty[$ . Cet intervalle est affiné au fur et à mesure que de nouvelles informations sont connues.

On peut, si les informations nécessaires sont disponibles et ont la forme appropriée, établir une fonction de distribution de probabilité sur le futur. C'est une expression mathématique de la probabilité de faute ou de défaillance du système dans le temps. Alors un intervalle temporel en découlera naturellement. Par exemple pour une Gaussienne un intervalle de  $3\sigma$  autour de la moyenne contiendra la date de la faute dans 99% des cas. L'indice de confiance que nous choisissons sera explicité plus loin dans la section 3.4.2.

### 1.4.5 Conclusion

Dans cette section les trois grandes méthodes de pronostic ont été présentées, et des illustrations issues de la littérature ont été proposées. Nous réalisons que le principe est le même pour les trois méthodes : il s'agit de construire une loi de vieillissement avec une base de connaissances préalable, puis de l'utiliser pour savoir comment, à partir de l'état de santé présent, évolueront

l'état de santé et l'état fonctionnel du système.

La base de connaissances peut être soit un retour d'expérience sur les durées de vie des équipements, soit des données de vieillissement enregistrées en service ou en essai, soit des modèles analytiques de vieillissement. De même que pour le diagnostic, plus la base de connaissances en entrée est riche, et plus les informations en sortie sont riches, les plus riches correspondant à la méthode à base de modèles qui apporte des informations sur les phénomènes physiques liés aux dégradations et aux fautes. Nous avons proposé une représentation des méthodes classiques sous forme de tonneau, qui nous semble être mieux adaptée aux applications aéronautiques que la représentation sous forme de pyramide.

Un état de l'art des lois de vieillissement qui peuvent être utilisées est introduit. Nous avons construit un tableau synthétique qui permet de choisir parmi ces lois laquelle est la mieux adaptée pour différentes applications et suivant les connaissances disponibles et les informations souhaitées en sortie du module de pronostic (en annexe).

Pour notre application, peu de données de vieillissement sont disponibles, et nous avons besoin d'une méthode générique et d'informations précises sur l'état de santé du système pour optimiser au mieux les opérations de maintenance. De plus nous souhaitons avoir une cohérence entre les méthodes de diagnostic et de pronostic. Nous privilégions donc, pour le pronostic également, la méthode à base de modèles.

Nous proposons ensuite un état de l'art sur la manière de gérer les incertitudes inhérente au pronostic.

Les connaissances sur le comportement de l'équipement et sur son vieillissement peuvent être obtenues lors de la vie de l'équipement, mais des essais dédiés permettent d'obtenir des données sur des phénomènes ciblés. Les essais qui peuvent être réalisés en préambule du diagnostic et du pronostic sont présentés en détails en annexe 2.

## Conclusion

Dans ce chapitre le contexte industriel de l'avion plus électrique et de l'optimisation de la maintenance par le Health Monitoring ont été présentés. Les méthodes de diagnostic et de pronostic ont été discutées. Nous en avons déduit que dans un souci de généricité et pour notre application de moto-pompe, nous désirons développer une méthode de Health Monitoring à base de modèles.

Une étude poussée de la littérature dédiée au pronostic nous a montré que de nombreux points durs restent à être traités.

Le pronostic nécessite une grande connaissance pluridisciplinaire et le support d'experts et spécialistes dans des domaines de pointe : capteurs, science des matériaux, modélisation, algorithmes, fusion de données, réduction de données, probabilités, statistique, conception. Nous aborderons une partie de ces différentes facettes dans ce manuscrit.

Le pronostic nécessite une très bonne connaissance des équipements et de leurs modes de faute. Or le savoir est parfois détenu par les fournisseurs. De plus, pour parfaire cette connaissance il est utile de réaliser de nombreux essais, mais cela représente un budget conséquent. Il est très difficile de bien connaître les stress, les mécanismes de panne, leurs interactions. C'est pourquoi



nous souhaitons une méthode adaptable à la nature et à la quantité de données d'entrée.

Au niveau des méthodes, nous remarquons une absence de méthodes génériques ou évolutives. Il y a un manque de flexibilité des méthodes qui ne s'attachent qu'à une application unique. De plus la plupart des approches sont orientées composants, or il est intéressant d'élargir l'ensemble des modèles de dégradation de composants et les inclure dans un modèle global. En effet sans étude préalable, il peut être impossible de généraliser une approche basée sur un modèle physique orienté composant à une approche système. Les dépendances complexes entre les variables sont mal connues. Il en va de même pour la propagation de faute entre les composants. C'est pourquoi nous souhaitons une approche orientée système pour la vision globale, mais compositionnelle pour la modularité et la flexibilité.

Nous voyons que l'importance de connaître l'impact des conditions d'opération pour avoir un pronostic ajustable suivant l'environnement est souvent soulignée. C'est pourquoi nous nous attacherons à représenter l'environnement dans notre méthode.

On retrouve aussi souvent l'idée que les résultats du pronostic à base de modèles sont limités par la précision des modèles, qui sont souvent incomplets, imprécis, avec de nombreuses incertitudes dans les paramètres. Nous pensons que lorsque l'on travaille dans un domaine lié à la prédiction du futur il est impossible de s'affranchir des incertitudes. Par contre, il est nécessaire de pouvoir les estimer. C'est pourquoi nous proposons une méthode à cet effet.

Nous avons vu que nous privilégions une approche de Health Monitoring à base de modèles. Le coeur théorique de notre étude est tout d'abord la mise en place d'un cadre générique de modélisation de la vie d'un équipement ; cela nous permet ensuite de proposer une méthode formelle de diagnostic et de pronostic basée sur ce cadre de modélisation. C'est l'objet du chapitre suivant.



# Mise en place d'un cadre générique de modélisation de la vie d'un équipement

**Résumé :** nos réflexions sur la construction d'une méthode générique de Health-Monitoring à base de modèle nous font prendre conscience de la nécessité de construire un cadre générique de modélisation. C'est ce cadre formel qui est présenté dans ce chapitre. La modélisation fonctionnelle et structurelle du système permet de représenter le comportement du système, conçu comme une union de composants, et orienté vers la réalisation de fonctions. La modélisation du vieillissement du système permet de représenter l'évolution de l'état de santé du système dans le temps, notamment lorsque son endommagement augmente. L'impact des endommagements et des fautes sur les performances des fonctions et sur la durée de vie utile du système est également modélisé. Un modèle complet du système est ainsi construit sur trois niveaux, synthétisant les informations nécessaires à la fois au diagnostic et au pronostic, de santé et fonctionnel.

## Introduction

Quelles que soient les méthodes, nous avons vu dans le chapitre 1 que les principes du diagnostic et du pronostic sont similaires aux outils et techniques près. C'est pourquoi nous souhaitons construire un formalisme générique pour le diagnostic et le pronostic, qui s'affranchira du choix de la méthode. Nous privilégions certes la méthode à base de modèles, mais comme le souligne [Vas08], la classification de méthodes de pronostic est ambiguë puisque basée sur certains choix comme par exemple la définition du mot modèle. Nous choisissons d'étendre le pronostic à base de modèles à tous types de modèles, qu'ils soient analytiques, statistiques, ou même cachés. Ainsi les trois grandes catégories de diagnostic et de pronostic présentées dans le chapitre 1 peuvent s'intégrer dans le formalisme proposé.

Peu d'auteurs ont présenté un cadre commun et générique de diagnostic et de pronostic. Nous trouvons certes des travaux visant à établir un cadre standard, mais non commun, et généralement haut niveau. On peut citer [VLCI10] qui propose un modèle générique très haut niveau du pronostic pour la maintenance proactive, en présentant surtout l'organisation du pronostic et les flux de données d'entrée et sortie mais sans rentrer véritablement dans les méthodes. [CVLI10], [CVLI09] cherchent à définir le pronostic sans parler des méthodes mais uniquement du contexte, des problèmes soulevés, des données d'entrée nécessaires. Dans [LRB02] le but est de développer un système standard ouvert pour les systèmes CBM, de développer un cadre couvrant cette fois tous les aspects du Health Monitoring, de l'acquisition de données à la détection, au diagnostic, au pronostic, aux recommandations de maintenance, jusqu'à l'interface homme machine. Le cadre générique est modulaire et est codé sous XML. Là-encore, le cadre reste très haut niveau.

[SKP<sup>+</sup>11] rentre d'avantage dans les méthodes et décrit un cadre générique pour le pronostic guidé par les données. Le cadre permet de combiner les données statistiques obtenues hors ligne

et les données dynamiques enregistrées en ligne pour estimer l'état de santé et le RUL d'un équipement grâce au modèle de Cox. La méthode de pronostic est appliquée avec succès à un sous-système de contrôle électronique de ralentissement automobile.

Peu de cadre intégrant le diagnostic et le pronostic sont proposés dans la littérature, on en retrouve un dans [RD11]. Des modèles d'état décrivent le comportement nominal et en faute d'un système, et une équation d'évolution d'un vecteur de paramètres modélise la progression des fautes. L'identification des fautes est réalisée grâce à des observateurs d'état, le pronostic calcule le RUL en utilisant un estimateur basé sur les modèles de progression de faute. Un deuxième exemple se retrouve dans ([BS04]), où est développé un paradigme pour la détection de faute et la prédiction de défaillances pour les actionneurs. C'est une approche à base de modèles physiques et de techniques avancées d'identification des paramètres, combinés avec des algorithmes de détection de faute et de prédiction de durée de vie restante. Ces algorithmes sont mis en place sur des données provenant de la commande ou de la réponse des actionneurs de commande de vol. Ici le cadre est commun, mais non générique puisque dédié à une application précise.

Même lorsqu'aucun cadre commun n'est proposé, on retrouve souvent l'idée que diagnostic et pronostic doivent pouvoir communiquer. Par exemple chez [BRG02] le but est de compléter les méthodes de diagnostic existantes avec des modules de pronostic interopérables "plug and play" (c'est-à-dire prêts à l'emploi). Deux architectures sont proposées :

- horizontale : le pronostic utilise les informations de diagnostic, c'est la méthode à privilégier si l'on souhaite un résultat précis ;
- verticale : le pronostic n'utilise pas les informations de diagnostic mais uniquement les informations sur les conditions environnementales et éventuellement des mesures sur le système. C'est la méthode à utiliser faute de mieux.

Suite à l'identification de lacunes dans la littérature, nous souhaitons construire une méthode générique de diagnostic et pronostic à base de modèle. La première étape est donc de créer un cadre générique de modélisation de l'équipement. Pour se faire nous nous basons sur le cadre de modélisation construit par [Rib09], et nous nous plaçons en développement de ses propositions.

Nous proposons tout d'abord une modélisation fonctionnelle et structurelle, puis nous l'enrichissons d'une modélisation du vieillissement, afin de pouvoir représenter la vie complète de l'équipement. L'ensemble constitue un cadre de modélisation commun qui représente synthétise les connaissances utiles au diagnostic et au pronostic, et sur lequel nous pourrions baser notre méthode formelle générique de diagnostic et pronostic.

## 2.1 Modélisation fonctionnelle et structurelle du système

### 2.1.1 Les composants du système et les fonctions élémentaires

L'équipement à surveiller est modélisé comme un système  $\Sigma$ . Cet équipement peut-être constitué de plusieurs parties, ou sous-équipements, qui seront alors appelés des composants  $\mathcal{C}^i$ . Le système  $\Sigma$  est défini comme un ensemble de composants,  $\Sigma = \{\mathcal{C}^1, \dots, \mathcal{C}^n\}$ .

L'équipement évolue sous certaines conditions environnementales, avec des équipements environnants. Ce cadre est appelé l'environnement du système, noté  $\mathcal{E}^\Sigma$ . De même, un composant  $\mathcal{C}^i$  est

situé dans un environnement  $\mathcal{E}^i$ , constitué de tout ce qui n'est pas le composant  $\mathcal{C}^i$ .

$$\mathcal{E}^i = (\Sigma \cup \mathcal{E}^\Sigma) \setminus \{\mathcal{C}^i\} \quad (2.1)$$

L'environnement du système est alors :  $\mathcal{E}^\Sigma = \bigcap_{i=1}^n \mathcal{E}^i$ .

Des quantités physiques et/ou informations circulent, sont échangées ou transformées dans l'équipement et ses sous-parties. Ces quantités sont modélisées par des paramètres  $p$ . L'ensemble des paramètres du composant  $\mathcal{C}^i$  est  $\mathcal{P}^i = \{p^{i,k}\}$ . Les circulations, échanges, ou encore transformations des quantités physiques sont modélisés par des relations  $ar$  entre les paramètres. L'ensemble des relations entre les paramètres du composant  $\mathcal{C}^i$  est  $\mathcal{A}^i = \{ar^{i,k}\}$ . Une relation est modélisée comme :

$$\begin{cases} ar^{i,k} : P(\mathcal{P}^i) \longrightarrow \mathcal{A}^i \\ (p^{i,1}, \dots, p^{i,l_i}) \longmapsto ar^{i,k}(p^{i,1}, \dots, p^{i,l}) = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Le support de la relation,  $Supp(ar^{i,k})$ , est l'ensemble des paramètres qui apparaissent dans la relation. Plus généralement nous définissons le support  $Supp(f)$  d'une fonction mathématique  $f$  quelconque comme l'ensemble des paramètres qui apparaissent dans la définition de la fonction.

Un composant est défini comme l'ensemble de ses paramètres et des relations qui les lient :

$$\mathcal{C}^i = \langle \mathcal{P}^i, \mathcal{A}^i \rangle \quad (2.3)$$

Le système, défini comme un ensemble de composants, est alors représenté comme :

$$\Sigma = \langle \mathcal{P}, \mathcal{A} \rangle, \mathcal{P} = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}^i, \mathcal{A} = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{A}^i \quad (2.4)$$

L'environnement  $\mathcal{E}^\Sigma$  est un système, qui est en interaction avec le système  $\Sigma$  considéré, mais dont les paramètres et les relations entre paramètres ne sont pas forcément connus.

Chaque composant a pour but de fournir une ou plusieurs fonctions élémentaires souhaitées par l'utilisateur. Une fonction est définie comme une circulation de quantités (physiques ou représentant une information) vers l'environnement, avec les caractéristiques souhaitées par l'utilisateur. La quantité correspondante est modélisée par un paramètre  $op$  appelé paramètre de sortie. L'ensemble des paramètres de sortie est noté  $\mathcal{OP}^i = \{op^{i,k}\}$ . Un paramètre de sortie est un port d'échange entre un composant  $\mathcal{C}^i$  et son environnement  $\mathcal{E}^i$ .

Chaque fonction élémentaire  $Fu^{i,k}$  est représentée par une relation entre un paramètre de sortie et d'autres paramètres du système. Cette relation est obtenue en transformant la relation  $ar^{i,k}$  faisant apparaître  $op^{i,k}$ . L'ensemble des fonctions élémentaires du composant est noté  $\mathcal{FU}^i = \{Fu^{i,k}\}$ . Les fonctions sont modélisées comme :

$$\begin{cases} Fu^{i,k} : P(\mathcal{P}^i) \longrightarrow \mathcal{OP}^i \\ \{p^{i,j}\} \longmapsto op^{i,k} = Fu^{i,k}(\{p^{i,j}\}) \end{cases} \quad (2.5)$$

Cet aspect fonctionnel des composants implique une causalité. Les paramètres d'échange avec l'environnement deviennent soit des paramètres de sortie du composant s'ils modélisent la quantité résultat d'une fonction, soit des paramètres d'entrée  $ip$ .

*Exemple.* Soit  $\mathcal{C}^1$  une résistance électrique  $R$ . Ses paramètres sont  $\mathcal{P}^1 = \{R, U, I\}$  où  $U$  est la tension aux bornes de la résistance et  $I$  est l'intensité traversant la résistance. La relation entre ces paramètres est :  $ar^{1,1}(R, U, I) = U - RI = 0$ . La résistance peut avoir deux fonctions suivant les besoins de l'utilisateur :

- si la fonction est d'engendrer une chute de tension, alors  $op^{1,1} = U = Fu^{1,1}(R, I) = RI$  et  $Supp(Fu^{1,1}) = \{R, I\}$  ;
- si la fonction est d'engendrer la création d'un courant, alors  $op^{1,1} = I = Fu^{1,2}(R, U) = U/R$  et  $Supp(Fu^{1,2}) = \{R, U\}$ .

### 2.1.2 La structure du système, les paramètres et leurs rangs

La valeur d'un paramètre est donnée par la fonction  $v$  :

$$\begin{cases} v : (\mathcal{P}, T) \longrightarrow \mathbb{C} \\ (p^{k,l}, t) \longmapsto v(p^{k,l}, t) \in \mathbb{C} \end{cases} \quad (2.6)$$

Le système possède des ports d'échange entre ses composants. Les valeurs des paramètres au niveau d'un port d'échange entre deux composants sont toujours identiques. Ceci est modélisé par la structure du système, avec la fonction  $st$  :

$$\begin{cases} st : \mathcal{P} \longrightarrow \mathcal{P}(\mathcal{P}) \\ p^{j,l} = st(p^{k,m}) \Rightarrow \forall t, v(p^{k,l}, t) = v(p^{j,m}, t) \end{cases} \quad (2.7)$$

Les composants et les paramètres concernés sont dits structurellement liés. La structure repose sur l'aspect structurel et non pas fonctionnel de l'équipement. La fonction  $st$  est réflexive, transitive, et symétrique.

*Exemple.* Dans le modèle d'un groupe moto-pompe, la pompe et le moteur sont structurellement liés via la vitesse mécanique modélisée par les paramètres  $\Omega^{moteur}$  et  $\Omega^{pompe}$ . En effet l'arbre du moteur et l'arbre de la pompe sont physiquement reliés.  $\forall t, \Omega^{moteur}(t) = \Omega^{pompe}(t)$ .

Les paramètres autres que les paramètres de sortie sont divisés en deux catégories :

- les paramètres d'entrée dont la valeur est identique à celle de paramètres de sortie de  $\mathcal{E}^i$  à travers  $st$ , ils sont notés  $ip^{i,k} \in \mathcal{IP}^i$ . Ils représentent les quantités entrant dans le composant au sens de la causalité établie par l'aspect fonctionnel ;
- les paramètres privés qui ne sont structurellement liés à aucun autre paramètre, notés  $pp^{i,k} \in \mathcal{PP}^i$ . Ils représentent des quantités qui ne sont pas échangées dans le système mais qui appartiennent à un composant.

Si l'on reprend l'exemple de la résistance,  $U$  et  $I$  sont des ports d'échange, donc soit des paramètres d'entrée soit des paramètres de sortie, alors que  $R$  est un paramètre privé.

Dans les modèles usuels, les paramètres d'entrée et de sortie représentent les variables (ce sont les paramètres à dynamique rapide), tandis que les paramètres privés représentent les constantes (paramètres à dynamique lente).

Finalement l'ensemble des paramètres est  $\mathcal{P}^i = \mathcal{IP}^i \cup \mathcal{OP}^i \cup \mathcal{PP}^i$

$$p^{i,k} \in \mathcal{OP}^i \Leftrightarrow \exists Fu^{i,k} \in \mathcal{FU}^i | p^{i,k} = Fu^{i,k}(ar^{i,k}) \quad (2.8)$$

$$p^{i,k} \in \mathcal{IP}^i \Leftrightarrow \begin{cases} \exists p^{\mathcal{E},j} \in \mathcal{P}^{\mathcal{E}^i} \mid p^{i,k} = st(p^{\mathcal{E},j}) \\ p^{i,k} \notin \mathcal{OP}^i \end{cases} \quad (2.9)$$

$$p^{i,k} \in \mathcal{PP}^i \Leftrightarrow \nexists p^{\mathcal{E},j} \in \mathcal{P}^{\mathcal{E}^i} \mid p^{i,k} = st(p^{\mathcal{E},j}) \quad (2.10)$$

*Exemple.* Soit  $\mathcal{C}^i$  la pompe hydraulique. Pour simplifier l'exemple on ne considère que les paramètres de type vitesse (vitesse de rotation, débit) et pas les paramètres de type effort (couple, pression).

L'ensemble des paramètres est donc :  $\mathcal{P}^i = \{\Omega, Q, Cyl\}$  où  $\Omega$  est la vitesse de rotation de l'arbre,  $Q$  est le débit volumique du fluide,  $Cyl$  est la cylindrée de la pompe. La relation liant les paramètres est  $ar(\Omega, Q, Cyl) = Q - \Omega Cyl = 0$ . Il y a deux possibilités concernant la fonction élémentaire de la pompe :

1. Si la pompe travaille en quadrant moteur, la fonction est de produire un débit, alors  $op = Q = Fu(Q - \Omega Cyl) = \Omega Cyl$ . Alors  $Q \in \mathcal{OP}^i$ . La pompe est structurellement liée avec  $\mathcal{E}^i$  via  $\Omega$  puisque c'est la vitesse imposée par le moteur, donc  $\Omega \in \mathcal{IP}^i$ .  $Cyl$  n'est structurellement lié à aucun autre composant, donc  $Cyl \in \mathcal{PP}^i$ .

2. Si la pompe travaille en quadrant frein, la fonction est de produire une vitesse (la pompe fonctionne en moteur), alors  $op = \Omega = Fu(Q - \Omega Cyl) = Q/Cyl$ . Alors  $\Omega \in \mathcal{OP}^i$ . La pompe est structurellement liée avec  $\mathcal{E}^i$  via  $Q$  puisque c'est le débit imposé par l'environnement, donc  $Q \in \mathcal{IP}^i$ .  $Cyl$  n'est structurellement lié à aucun autre composant, donc  $Cyl \in \mathcal{PP}^i$ .

Les paramètres représentant des quantités physiques ou des informations, leur plage de valeur est limitée. Un rang est donc défini pour chaque paramètre, modélisant l'ensemble de valeurs possibles pour le paramètre. Le rang d'un paramètre  $r(p^i)$  est tel que  $\forall t, v(p^i, t) \in r(p^i)$ . L'ensemble des rangs des paramètres du composant  $\mathcal{C}^i$  est noté  $\mathcal{R}^i$ . Généralement, les rangs sont de la forme :

- $r(p^i) = [\alpha^i, \beta^i]$  avec  $(\alpha^i, \beta^i) \in \mathbb{R}^2$  et  $\alpha^i \leq \beta^i$  (continu) ;
- $r(p^i) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  (discret, éventuellement booléen).

Le paramètre peut parfois modéliser une quantité représentée par un vecteur. C'est le cas par exemple d'un signal variant dans le temps, modélisé par un paramètre qui doit représenter à la fois son amplitude, sa phase, sa fréquence s'il est périodique, ou encore ses différents harmoniques et leurs amplitudes.

*Exemple.* Soit  $\mathcal{C}^i$  la résistance  $R$ . Les paramètres  $R$ ,  $U$  et  $I$  ont des valeurs numériques, respectivement en Ohms, Volts, et Ampères. Les valeurs de  $U$  et  $I$  sont limitées par la valeur maximale admissible pour leur produit  $U \times I$ , qui est en fait la puissance à partir de laquelle la résistance est détruite. Si le rang de la tension est  $[0; 50]$  et que la résistance supporte une puissance de 200W, le rang pour le courant sera  $[0; 4]$ . Si on a affaire à des tensions sinusoïdales, le rang sera de la forme d'un vecteur avec un rang pour l'amplitude par exemple toujours  $[0; 50]$ , et un rang pour la fréquence par exemple  $[49; 51]$  (en Hertz).

### 2.1.3 Les fonctions objectifs du système

L'intérêt de regrouper des sous-équipements pour former un équipement est de réaliser des fonctions objectifs en combinant les fonctions élémentaires. L'ensemble des fonctions du système est noté  $\mathcal{FU} = \{Fu^{i,k}\}$ . Les fonctions objectifs sont notées  $Fu^{\Sigma,k}$ .

De la même manière que des paramètres d'entrée et sortie sont définis à l'échelle des composants, on définit à l'échelle du système des paramètres d'échange avec l'environnement du système. Ces paramètres d'échange sont là aussi divisés en paramètres d'entrée et en paramètres de sortie, suivant les causalités définies par les fonctionnalités attendues dans le système :

$$p^{i,k} \in \mathcal{OP}^\Sigma \Leftrightarrow \exists Fu^{\Sigma,k} \in \mathcal{FU}^\Sigma | p^{i,k} = Fu^{\Sigma,k}(ar^{\Sigma,k}) \quad (2.11)$$

$$p^{i,k} \in \mathcal{IP}^\Sigma \Leftrightarrow \begin{cases} \exists p^{\mathcal{E},j} \in \mathcal{P}^{\mathcal{E}^\Sigma} | p^{i,k} = st(p^{\mathcal{E},j}) \\ p^{i,k} \notin \mathcal{OP}^\Sigma \end{cases} \quad (2.12)$$

### 2.1.3.1 Combinaison logique de fonctions

La combinaison des fonctions du système est représentée par la fonction  $Cb$  :

$$\begin{cases} Cb : P(\mathcal{FU}) \longrightarrow P(\mathcal{FU}) \\ \{Fu^{i1,k1}, \dots, Fu^{il,kl}\} \longmapsto \{Fu^{im,km}, Fu^{in,kn}\} = Cb(\{Fu^{i1,k1}, \dots, Fu^{il,kl}\}) \end{cases} \quad (2.13)$$

$Cb$  est une fonction bijective. Sa fonction inverse  $Pred = Cb^{-1}$  détermine les prédécesseurs de fonctions. La notation  $Pred(\{Fu^{im,km}\}) = \{Fu^{i1,k1}, \dots, Fu^{il,kl}\}$  signifie que  $Fu^{im,km}$  est une combinaison par  $Cb$  de l'ensemble des prédécesseurs  $\{Fu^{i1,k1}, \dots, Fu^{il,kl}\}$ .

La combinaison est une relation logique, composée de ET et de OU logiques. Elle permet d'écrire les fonctions sous la forme d'une combinaison logique d'autres fonctions du système :

$$Fu^{\Sigma,1} = Cb(Fu^{i,1}, Fu^{j,1}, Fu^{j,2}, Fu^{k,1}) = (Fu^{i,1} \wedge Fu^{j,1}) \vee (Fu^{j,2} \wedge Fu^{k,1}) \quad (2.14)$$

Cela permet de construire un arbre des fonctions pour chaque fonction objectif. Les liaisons OU représentent les redondances fonctionnelles.

Un exemple d'arbre des fonctions est proposé sur la figure 2.1. Il correspond à l'expression suivante :

$$Fu^{\Sigma,1} = Fu^{\Sigma,1} \vee (Fu^{1,1} \wedge Fu^{2,1}) \vee (Fu^{2,2} \wedge Fu^{3,1}) \quad (2.15)$$

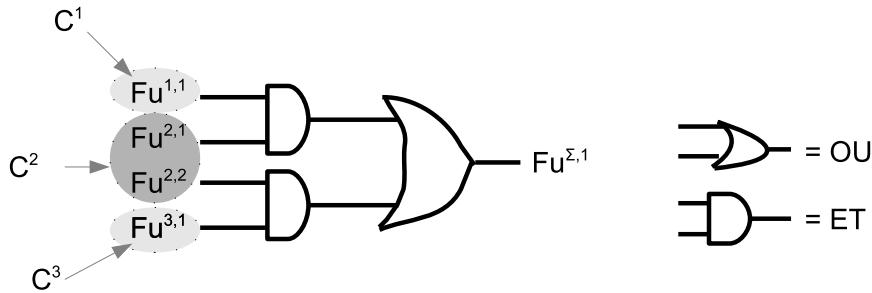


FIGURE 2.1 – Combinaisons de fonctions élémentaires pour former une fonction objectif, et représentation sous forme d'arbre des fonctions

### 2.1.3.2 Combinaison analytique de fonctions

Pour chaque fonction  $Fu^{i,k}$  on associe une ou plusieurs relations analytiques  $ar^{i,kx}$  composées de relations analytiques de plusieurs composants  $ar^{j,l}$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} ar^{i,kx} : P(\mathcal{P}) \longrightarrow \mathcal{A} \\ (\{p^{j,l}\}) \longmapsto ar^{i,kx}(\{p^{j,l}\}) = 0 \end{array} \right. \quad (2.16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Fu^{i,k} : P(\mathcal{P}) \longrightarrow \mathcal{OP}^i \\ \{p_{m \in \{1, \dots, n\}}^{m,p}\} \longmapsto op^{i,k} = Fu^{i,k}(\{p_{m \in \{1, \dots, n\}}^{m,p}\}) \end{array} \right. \quad (2.17)$$

$ar^{i,kx}$  est composée des  $ar^{jy,ly}$  telles que  $Fu^{i,k} = Fu^{j1,l1} \wedge \dots \wedge Fu^{js,ls}$ . Notons qu' $ar^{i,kx}$  n'est pas unique s'il y a des redondances dans le système.

Pour combiner les relations analytiques correspondant à plusieurs fonctions, une composition de fonctions est réalisée. Les paramètres d'entrée  $ip^{i,j} \in \mathcal{IP}^i$  sont remplacés récursivement par les relations analytiques associées aux paramètres de sortie  $op^{m,n} = st(ip^{i,j})$ .

*Exemple 1.* Soit un système constitué de deux composants : un moteur et une pompe. La fonction objectif du système est de fournir un certain débit  $Q$ . Cette fonction est réalisée en combinant les fonctions de ses deux composants. La fonction élémentaire du moteur est de transformer la puissance électrique en puissance mécanique. La fonction élémentaire de la pompe est de transformer la puissance mécanique en puissance hydraulique se traduisant par un débit. Ces deux fonctions élémentaires se combinent pour former la fonction objectif du système. Soient les fonctions suivantes :  $Fu^{m,1} = \text{Transformer } U \text{ en } \Omega$ , l'équation associée est  $\Omega = K_e \times U$  ;  $Fu^{p,1} = \text{Transformer } \Omega \text{ en } Q$ , l'équation associée est  $Q = Cyl \times \Omega$  ;  $Fu^{\Sigma} = \text{Fournir } Q$ . Alors les prédecesseurs des fonctions sont  $Pred(\{Fu^{\Sigma}\}) = \{Fu^{m,1}, Fu^{p,1}\}$ ,  $Pred(\{Fu^{p,1}\}) = \{Fu^{m,1}\}$ , et  $Pred(\{Fu^{m,1}\}) = \{\phi\}$ . La fonction du système est obtenue par combinaison, via  $Cb(\{Fu^{m,1}, Fu^{p,1}\}) = Fu^{\Sigma}$ , et la relation logique associée est  $Fu^{\Sigma} = Fu^{\Sigma} \vee (Fu^{m,1} \wedge Fu^{p,1})$ . L'équation analytique associée à la fonction est trouvée en combinant les deux équations des deux fonctions élémentaires :  $Q = Cyl \times K_e \times U$ .

*Exemple 2.* L'un des équipements de Messier-Bugatti-Dowty, un actionneur EMA d'atterrisseur (Concept Innovant de Systèmes d'Actionnement de Commandes de vols secondaires et de Servitudes, [NEV12]), peut fonctionner en mode normal ou en mode secours, ce qui permet d'illustrer les redondances fonctionnelles. Il s'agit d'un actionneur d'extension/rétraction du train d'atterrissage. En mode normal, un moteur électrique fournit la puissance nécessaire au système vis-écrou pour entraîner la vis en translation et descendre ou monter le train d'atterrissage. Le mode secours est utilisé en cas de grippage du système vis-écrou, ou en cas de défaillance du moteur. Dans ce cas, un motoréducteur active le mode secours et libère le système vis-écrou, qui est alors entraîné par la gravité. Le mode secours ne fonctionne qu'en extension. Si nous considérons les fonctions suivantes :  $Fu^{EMA} = \text{Réaliser l'extension du train d'atterrissage}$ ,  $Fu^{norm,1} = \text{Transformer la puissance électrique en puissance mécanique}$ ,  $Fu^{norm,2} = \text{Transformer la puissance mécanique en translation de la vis}$ ,  $Fu^{sec,1} = \text{Transformer la puissance électrique en puissance mécanique}$ ,  $Fu^{sec,2} = \text{Libérer le système vis-écrou}$ , alors l'arbre des fonctions découle de  $Fu^{EMA} = (Fu^{norm,1} \wedge Fu^{norm,2}) \vee (Fu^{sec,1} \wedge Fu^{sec,2})$



## 2.2 Modélisation du vieillissement du système

### 2.2.1 Les facteurs d'endommagement

Au cours de son utilisation un équipement vieillit, il est endommagé. Le vieillissement est dû à des stress, qui peuvent être de différentes natures : thermique, électrique, mécanique ou chimique.

*Exemple. La température, les contraintes mécaniques, ou encore la pollution dans un fluide n'aident pas à la fonction mais contribuent au vieillissement.*

Dans notre approche les stress sont modélisés par des paramètres appelés les facteurs d'endommagement. L'ensemble des facteurs d'endommagement d'un composant  $\mathcal{C}^i$  est noté  $\mathcal{D}^i = \{df_i^i\}$ . L'ensemble des facteurs d'endommagement du système  $\Sigma$  est noté  $\mathcal{D}^\Sigma = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{D}^i$ .

Les facteurs d'endommagement ont une valeur définie par la fonction  $v$  :

$$\begin{cases} v : (\mathcal{D}, T) \longrightarrow \mathbb{C} \\ (df, t) \longmapsto v(df, t) \in \mathbb{C} \end{cases} \quad (2.18)$$

De la même manière que pour les paramètres, des rangs sont définis pour les facteurs d'endommagement, ils sont notés  $r(df_i^i)$  et tels que  $\forall t, v(df_i^i, t) \in r(df_i^i)$ .

### 2.2.2 L'endommagement

Le vieillissement de l'équipement est caractérisé par son endommagement. Pour la grande majorité des systèmes construits par l'homme l'endommagement est irréversible, les effets des événements endommageants se cumulent. L'endommagement est nul au début de la vie de l'équipement et croît au fur et à mesure du vieillissement.

Les paramètres privés et leurs valeurs représentent l'état de santé du système : ils modélisent une caractéristique physique intrinsèque à un composant (par exemple la résistance d'un câble électrique, le jeu diamétral entre un piston et sa chemise), et la modification de leur valeur représente un changement dans l'état de santé du composant, donc un endommagement.

Dans notre approche, l'endommagement  $e^{i,j}$  à l'instant  $t$  est modélisé comme la distance entre la valeur du paramètre privé à cet instant  $v(pp^{i,j}, t)$  et sa valeur initiale  $pp_0^{i,j}$  :

$$e^{i,j}(t) = d(pp_0^{i,j}, v(pp^{i,j}, t)) \quad (2.19)$$

avec  $pp_0^{i,j} = v(pp^{i,j}, t_0)$  et donc  $e^{i,j}(t_0) = 0$ .

*Exemple. Pour la pompe considérée seule dans son environnement, un facteur d'endommagement est la pollution du fluide. Elle entraîne une usure accélérée des composants et une prise de jeux mécaniques fonctionnels entre certaines pièces notamment au niveau des pistons et du barillet. Cette augmentation des jeux se traduit par une augmentation des fuites internes, et est donc modélisée comme une diminution de la cylindrée apparente, qui est un paramètre privé de la pompe.*

La quantité ajoutée à l'endommagement dans un intervalle de temps donné est appelée dommage. L'endommagement étant cumulatif, les dommages  $\Delta e$  s'accumulent au fil du temps, comme le montre la figure 2.2.

$$e^{i,j}(t_{k+1}) = e^{i,j}(t_k) + \Delta e \quad (2.20)$$

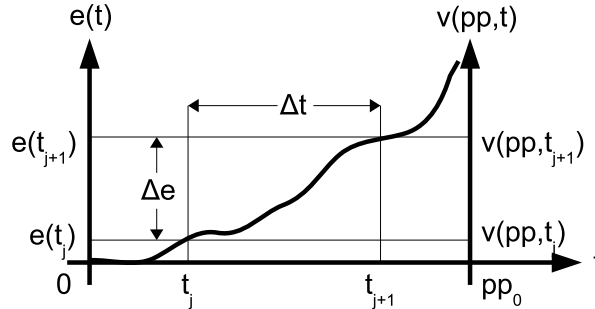


FIGURE 2.2 – Evolution de l'endommagement  $e$  et du paramètre privé  $pp$  au cours du temps. Représentation du dommage  $\Delta e$  dans l'intervalle de temps  $\Delta t$ .

On pose l'hypothèse qu'il y a un endommagement possible par paramètre privé, et chaque composant a donc plusieurs endommagements possibles.

La loi de vieillissement, notée  $ag$ , permet de calculer la valeur de l'endommagement  $e$  en fonction des valeurs des facteurs d'endommagement  $df_1^i, \dots, df_n^i$ . Sa forme peut varier mais l'endommagement étant cumulatif,  $ag$  est croissante dans le temps. De plus la loi de vieillissement est telle que l'endommagement est nul au début de la vie de l'équipement, et constant lorsque les facteurs d'endommagement sont nuls. La loi de vieillissement est définie formellement comme :

$$\begin{cases} ag : \mathbb{C} \times T \longrightarrow \mathbb{C} \\ (df_1^i, \dots, df_n^i, t) \longmapsto e^{i,j}(t) = ag(df_1^i, \dots, df_n^i, t) \end{cases} \quad (2.21)$$

Notons qu'il est possible de définir un facteur d'endommagement global  $df^i$  fonction des facteurs d'endommagement  $df$ . Cela permet, si besoin, d'avoir un paramètre unique dont dépend la loi de vieillissement, et ainsi d'intégrer dans cette approche des lois de vieillissement connues (voir la section 1.4.3). La relation entre  $df^i$  et les facteurs d'endommagement est définie par la fonction  $f_{df^i}$  :

$$\begin{cases} f_{df^i} : P(\mathcal{D}^i) \longrightarrow \mathbb{R} \\ (df_1^i, \dots, df_n^i) \longmapsto df^i = f_{df^i}(df_1^i, \dots, df_n^i) \end{cases} \quad (2.22)$$

### 2.2.3 La loi de rétroaction

Le stress que subit un équipement dépend de son environnement, mais aussi de son endommagement. En effet un composant endommagé a souvent un impact négatif plus fort sur son environnement et sur lui-même.

*Exemple. Si un composant de la pompe a un endommagement de type usure, il produira un facteur d'endommagement de type pollution du fluide, et aura donc un impact négatif sur les autres composants de la pompe, qui subiront une usure plus rapide à cause de la pollution.*

Ceci est modélisé par le fait que la valeur des facteurs d'endommagement dépend de l'état de santé du système. La fonction  $f_{df}$  donne le rang d'un facteur d'endommagement. Si le rang dépend de l'environnement du système, le support de  $f_{df}$  est l'environnement :  $Supp(f_{df}) = \mathcal{E}^\Sigma$  et le rang du facteur d'endommagement est obtenu grâce à la connaissance sur l'environnement. Si le rang dépend de l'état de santé du système, le support de  $f_{df}$  est un ensemble d'endommagements du système,  $Supp(f_{df}) = \{e^{x,y}\}$ , et :

$$\begin{cases} f_{df} : \mathcal{D}^\Sigma \times Supp(df_i^i) \longrightarrow I_{\mathbb{R}} \\ df_i^i \longmapsto r(df_i^i) = f_{df}(\{e^{x,y}(t)\}) \end{cases} \quad (2.23)$$

Ainsi, nous mettons en évidence le fait que la valeur de l'endommagement dépend de certains facteurs d'endommagement via la loi de vieillissement, et que la valeur des facteurs d'endommagement dépend de certains endommagements via la fonction  $f_{df}$ . Il y a donc une rétroaction de l'endommagement global du système sur les facteurs d'endommagement. Nous appelons la fonction  $f_{df}$  la loi de rétroaction.

#### 2.2.4 Le lien entre le modèle fonctionnel et le modèle de vieillissement

Nous définissons deux réseaux de circulations de quantités physiques et information pour le système :

- le réseau fonctionnel avec les paramètres d'entrée et de sortie et les paramètres privés. Il modélise des quantités qui circulent et qui sont échangées et transformées dans un but fonctionnel.
- le réseau d'endommagement avec les facteurs d'endommagement et les paramètres privés. Les facteurs d'endommagement agissent sur les paramètres privés avec pour conséquence l'augmentation de leur endommagement. La valeur des facteurs d'endommagement dépend à la fois de l'endommagement global du système et de l'environnement, c'est-à-dire des conditions dans lesquelles il est utilisé.

L'ensemble des paramètres privés est le dénominateur commun à ces deux réseaux. Ces deux réseaux ont une action et un fonctionnement très différents, mais leur composition est similaire avec des ports d'entrée et de sortie, des fonctions, et des paramètres, comme représenté sur la figure 2.3.

Ces deux réseaux évoluent en parallèle, mais le réseau d'endommagement agit sur le réseau fonctionnel via les paramètres privés, comme le montre la figure 2.4.

*Exemple. Si l'on reprend l'exemple de la pompe et de l'endommagement du paramètre privé Cyl, cet endommagement modifie la valeur du paramètre de sortie Q qui est obtenue comme combinaison du paramètre d'entrée  $\Omega$  et du paramètre privé Cyl qui a été modifié  $Q = Cyl \times \Omega$  Le réseau fonctionnel a été modifié.*

On peut voir sur la figure 2.5 que le réseau d'endommagement peut être modélisé comme un système bouclé. C'est un système naturellement bouclé, et non pas bouclé dans un but de contrôle/commande. Le système bouclé possède ou non des points d'équilibre pouvant être étu-

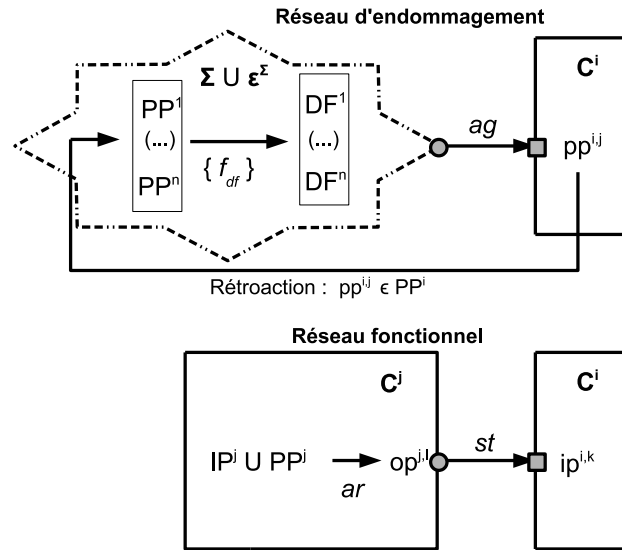


FIGURE 2.3 – Parallèle entre le réseau d'endommagement et le réseau fonctionnel

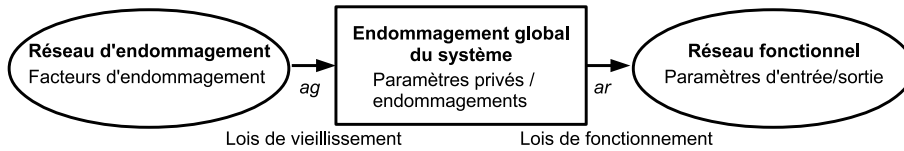


FIGURE 2.4 – Influence du réseau d'endommagement sur le réseau fonctionnel via l'endommagement global du système

diés avec les techniques de l'automatique. Il est intéressant de reprendre des propriétés bien connues qui s'appliquent à ce modèle, concernant notamment :

- la robustesse aux perturbations, les perturbations pouvant par exemple représenter les incertitudes sur les facteurs d'endommagement, ou les facteurs d'endommagement non pris en compte ;
- les conditions de stabilité du système ;
- le temps de réponse/ la rapidité d'évolution vers la valeur seuil.

Si établir le modèle de connaissance ou modèle physique est trop complexe, l'identification d'une loi simplifiée à partir de tests reste possible.

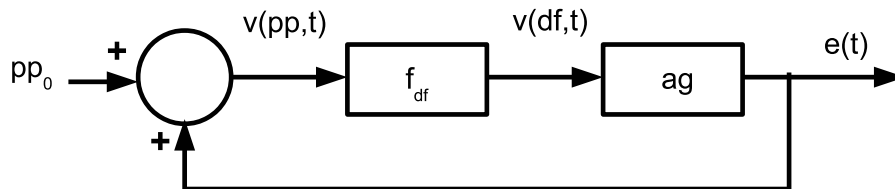


FIGURE 2.5 – Représentation du réseau d'endommagement sous forme de système bouclé

## 2.3 Modélisation des pertes de performance du système

### 2.3.1 La performance d'une fonction

L'utilisateur attend des quantités issues des fonctions objectifs qu'elles aient certaines valeurs précises. Plus les valeurs obtenues sont proches des valeurs souhaitées, meilleure est la performance de la fonction. Il existe donc une valeur optimale  $op_{opt}$  pour chaque paramètre de sortie du système, correspondant exactement aux attentes de l'utilisateur et donc à la performance optimale. Plus la valeur du paramètre de sortie s'éloigne de sa valeur optimale, moins la performance est bonne.

De la même manière on peut définir les valeurs optimales pour chaque paramètre de sortie des composants associés à des fonctions élémentaires.

Le vieillissement du système induit généralement une baisse de performance, voire une défaillance d'une ou plusieurs fonctions. Ceci est modélisé dans notre cadre, car des modifications de valeurs de paramètres privés appartenant au support d'une fonction entraînent des modifications de son paramètre de sortie via la relation analytique. Lorsque la perte de performance d'une fonction dépasse un seuil spécifié par l'utilisateur et pour l'utilisation, la fonction est déclarée défaillante. Par extension l'équipement est dit défaillant. Pour modéliser et quantifier cette perte de performance un indicateur  $def^{i,k}$  est associé à chaque fonction  $Fu^{i,k}$ . Il représente la distance entre le paramètre de sortie réel et le paramètre de sortie optimal souhaité par l'utilisateur :

$$def^{i,k}(t) = d(v(op^{i,k}, t), op_{opt}^{i,k}) \quad (2.24)$$

Cela permet de spécifier la performance à partir des attentes de l'utilisateur. En effet, comme le souligne [MCP<sup>+</sup>01], définir une défaillance nécessite de définir une fonction, et l'instant de défaillance dépend de la manière dont est définie la fonction. Par exemple les exigences fonctionnelles peuvent changer selon la mission. Dans notre modèle, ceci est reflété par un changement de  $op_{opt}^{i,k}$ .

*Exemple. Considérons l'exemple de la pompe, sa fonction élémentaire étant de fournir un certain débit. La valeur optimale du débit est déterminée selon l'usage qui est fait de la pompe. La performance est quantifiée par  $def^{i,k}(t) = d(Q(t), Q^{opt}) = Q(t) - Q^{opt}$ . Lorsque  $Q(t) = Q^{opt}$  la distance est nulle et la performance de la pompe est considérée maximale. Lorsque la pompe vieillit, pour un point de fonctionnement donné sa cylindrée efficace  $Cyl$  diminue. La vitesse  $\Omega$  reste la-même. Alors  $Q = Cyl \times \Omega$  diminue, et la distance entre la valeur de  $Q$  et sa valeur optimale augmente. La pompe présente une perte de performance due à son vieillissement.*

*Numériquement, si la vitesse est  $\Omega = 10000tr/min$ , avec une cylindrée nominale  $Cyl_0 = 2cc$ , le débit de sortie sera  $Q_{opt} = 20L/min$ . En cas d'endommagement, par exemple une usure des composants entraînant une augmentation des fuites internes, on aura une valeur de cylindrée plus faible. Si  $Cyl(t) = 1.8cc$ , alors  $Q(t) = 18L/min$ . Autrement dit, un endommagement  $e(t) = |Cyl(t) - Cyl_0| = 0.2$  entraînera une perte de performance  $def(t) = |Q(t) - Q_{opt}| = 2$ .*

### 2.3.2 La propagation de perte de performance dans le système

Nous avons vu que le vieillissement d'un composant impacte les valeurs de certains facteurs d'endommagement, pouvant ainsi accélérer le vieillissement du système. C'est la rétroaction à

l'intérieur du réseau d'endommagement. Mais le vieillissement d'un composant et la perte de performance induite peut aussi avoir des conséquences sur l'aspect fonctionnel du système via les autres paramètres du système. En effet lorsqu'un paramètre de sortie  $op^{i,k}$  de  $C^i$  s'éloigne de sa valeur optimale et qu'il est structurellement lié avec un paramètre d'entrée  $ip^{j,l}$  de  $C^j$ , alors la valeur du paramètre tel que  $ip^{j,l} = st(op^{i,k})$  est modifiée. Donc le composant  $C^j$  en interaction avec  $C^i$  subit une modification de la valeur de son paramètre d'entrée ce qui peut modifier la valeur de son/ses paramètres de sortie. C'est la propagation de perte de performance, représenté sur la figure 2.6.

On trouve déjà cette notion de propagation chez [ORCA12] qui appelle ceci une interconnection en cascade car tout dommage dans l'un des composants affectera la dynamique fonctionnelle, la dynamique de vieillissement, et la performance d'autres composants.

Grâce aux relations  $ar$ , il est possible de calculer la défaillance induite par un dommage, ou encore de calculer la défaillance induite sur les composants structurellement liés.

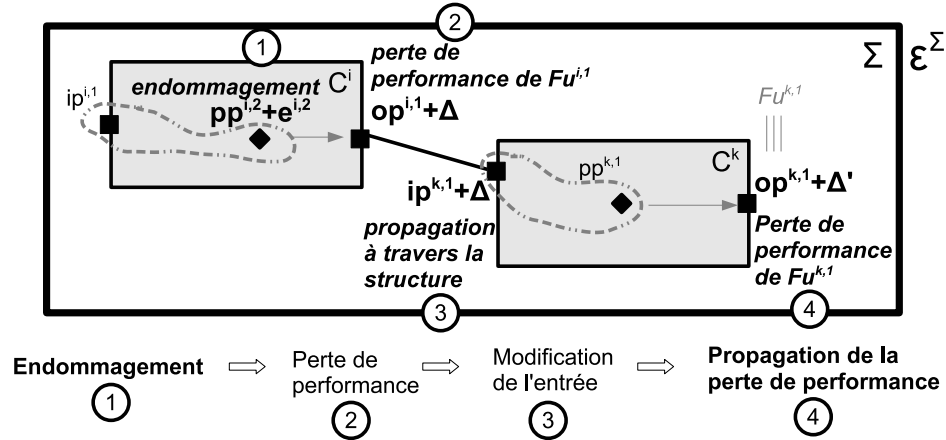


FIGURE 2.6 – Mécanisme de la propagation de perte de performance vers le composant  $C^k$  suite à l'endommagement du composant  $C^i$  qui lui est structurellement lié.

*Exemple.* Considérons un groupe moto-pompe. Si le moteur connaît une perte de performance, alors sa puissance mécanique fournie est plus faible, pour une charge donnée  $\Omega^{\text{moteur}}$  diminue. Comme c'est un paramètre structurellement lié au paramètre de la pompe  $\Omega^{\text{pompe}}$ , cela impacte directement le débit via  $Q = Cyl \times \Omega^{\text{pompe}}$ . Le débit diminue et la pompe connaît donc également une perte de performance, liée non pas à son propre vieillissement mais au vieillissement du moteur.

Avec la même valeur de cylindrée que précédemment,  $Cyl_0 = 2cc$ , si le moteur a une vitesse nominale de  $\Omega^{\text{moteur}} = 10000tr/min$  et qu'un endommagement entraîne une baisse de sa vitesse à  $\Omega^{\text{moteur}}(t) = 8000tr/min$ , c'est-à-dire une perte de performance de  $f^{\text{moteur}}(t) = 2000$ , alors l'entrée de la pompe sera  $\Omega^{\text{pompe}}(t) = 8000tr/min$ , d'où un débit  $Q(t) = Cyl_0 \times \Omega^{\text{pompe}}(t) = 16L/min$ , au lieu des  $20L/min$  optimaux. La pompe a donc une perte de performance de  $f^{\text{pompe}}(t) = 4$ . Il y a eu propagation de la perte de performance du moteur dans le système.

### 2.3.3 La disponibilité des fonctions et la fin de vie utile

D'après la définition 11, la présence d'une défaillance dans un équipement est caractérisée par la perte d'une fonction requise. Cela signifie que l'opération nécessitée par l'utilisateur n'est pas réalisée : la sortie réelle associée à la fonction est trop éloignée de la sortie attendue. Pour modéliser cela des seuils de panne sont définis pour chaque perte de performance :  $def_p^{i,k}$ . Ils sont fixés pour représenter le fait que  $op$  est trop éloigné de  $op_{opt}$  par rapport aux attentes de l'utilisateur. Lorsque  $def^{i,k} \geq def_p^{i,k}$ , la fonction n'est pas disponible, ce qui correspond bien à la définition 2.

La disponibilité d'une fonction est définie par :

$$\begin{cases} Av : (\mathcal{FU}, T) \longrightarrow \{0, 1\} \\ (Fu^{i,k}, t) \longmapsto Av(Fu^{i,k}, t) \end{cases} \quad (2.25)$$

$$Av(Fu^{i,k}, t) = \begin{cases} 0 & \text{ssi } (def^{i,k}(t) \geq def_f^{i,k}) \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.26)$$

*Exemple :*

*Pour la pompe, si le débit diminue trop,  $Q(t) - Q^{opt} \geq def_f$ , le débit n'est plus suffisant pour remplir la fonction souhaitée par l'utilisateur. La disponibilité de la fonction est nulle. La fonction est défaillante.*

Un composant est en fin de vie utile lorsqu'il ne remplit plus toutes ses fonctions élémentaires. La fonction de fin de vie utile EUL (*end of useful life*) d'un composant est définie comme :

$$\begin{cases} EUL : (\Sigma, T) \longrightarrow \{0, 1\} \\ (C^i, t) \longmapsto EUL(C^i, t) \end{cases} \quad (2.27)$$

$$EUL(C^i, t) = \begin{cases} 1 & \text{ssi } (\exists Fu^{i,k} \in \mathcal{FU}^i \mid Av(Fu^{i,k}, t) = 0) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.28)$$

De la même manière un système est en fin de vie utile lorsqu'il ne remplit plus toutes ses fonctions objectif. La fonction de fin de vie utile EUL est étendue aux systèmes comme :

$$\begin{cases} EUL^\Sigma : T \longrightarrow \{0, 1\} \\ t \longmapsto EUL^\Sigma(t) \end{cases} \quad (2.29)$$

$$EUL^\Sigma(t) = 1 \Leftrightarrow \exists Fu^\Sigma \in \mathcal{FU}_c(t) \mid Av(Fu^\Sigma, t) = 0 \quad (2.30)$$

Grâce à l'arbre des fonctions et à la fonction  $Cb$  il est possible de calculer la disponibilité des fonctions objectifs en connaissant la disponibilité de ses fonctions prédecesseurs, suivant les opérateurs logiques utilisés dans  $Cb$ . Les fonctions en conjonction doivent être toutes disponibles pour que la fonction combinaison soit disponible, au contraire pour les fonctions en disjonction il y a redondance fonctionnelle, et alors il suffit qu'au moins un des prédecesseurs soit disponible pour que la fonction combinaison soit disponible.

La relation entre la disponibilité d'une fonction et les disponibilités de ses prédecesseurs est de la forme  $Av(a \vee b) = \max(Av(a), Av(b))$ , et  $Av(a \wedge b) = Av(a) \times Av(b)$ .

Si l'on reprend l'exemple précédent, on a :

$$Pred(F4) = (F1 \vee F2) \wedge F3 \Rightarrow Av(F4, t) = \max(Av(F1), Av(F2)) \times Av(F3, t)$$

### 2.3.3.1 Les fonctions critiques

L'ensemble des fonctions nécessaires pour réaliser toutes les fonctions objectifs du système est l'ensemble des fonctions critiques à un instant  $t$ . Il est noté :  $\mathcal{FU}_c(t)$ .

$$\mathcal{FU}_c(t) = \{Fu^{i,k}\} \mid Av(Fu^{i,k}, t) = 0 \Rightarrow \exists Fu_g^\Sigma \mid Av(Fu_g^\Sigma, t) = 0 \quad (2.31)$$

L'ensemble  $\mathcal{FU}_c$  n'est pas un ensemble figé, car il dépend des disponibilités et des redondances fonctionnelles dans le système. En effet, si deux fonctions sont redondantes pour réaliser une fonction critique, la non-disponibilité de l'une de ces fonctions rend immédiatement la deuxième fonction critique. Et, si elle n'est plus disponible elle aussi, alors la fonction composée critique ne sera plus disponible.

Nous introduisons donc la notion de rang de criticité. Une fonction a un rang de criticité 1 si elle est indispensable. Elle a une criticité de rang  $n$  si elle est redondante avec  $n - 1$  autres fonctions. Si deux fonctions redondantes sont de criticité de rang 2, et que l'une des deux n'est plus disponible, l'autre passe en criticité de rang 1. Si une fonction de criticité de rang 1 n'est plus disponible, le RUL passe à 0.

Nous proposons une méthode basée sur des combinaisons logiques qui permettra de caractériser les ensembles de fonctions critiques à partir d'un arbre des fonctions. Cela s'apparente à la méthode des coupes minimales qui permet de générer les ensembles d'évènements nécessaires et suffisants pour obtenir une défaillance à partir d'un arbre de défaillances. Pour constituer les ensembles de fonctions critiques possibles, on considère un ensemble noté  $\mathcal{AF}$ , contenant toutes les fonctions du système  $\mathcal{FU}$ , et étant divisé en sous-ensembles (pas forcément disjoints) de fonctions  $\mathcal{AF}_j$  tels que  $\mathcal{AF} = \{\mathcal{AF}_1, \mathcal{AF}_2, \dots\}$ . Ces sous-ensembles sont construits de manière à ce que toutes les fonctions globales du système sont disponibles si et seulement si au moins une fonction de chacun des sous-ensembles est disponible.

Ainsi, un ensemble de fonctions critiques sera constitué en choisissant une fonction dans chacun des sous-ensembles  $\mathcal{AF}_j$  :

$$\mathcal{FU}_c(t) = \{Fu^{x,y}\}_{x,y:entiers} \mid \forall \mathcal{AF}_i \in \mathcal{AF}, \exists Fu^{x,y} \in \mathcal{AF}_i \cap \mathcal{FU}_c(t) \quad (2.32)$$

Rappelons que ces sous-ensembles ne sont pas disjoints, et donc l'ensemble des fonctions critiques peut comporter un nombre variable de fonctions, suivant qu'on y intègre ou pas des fonctions appartenant à plusieurs sous-ensembles.

Pour construire ces sous-ensembles, nous nous servons de l'arbre des fonctions. Cet arbre est traduit en une suite logique de toutes les fonctions du système, sous la forme des fonctions séparées par les opérateurs logiques  $\wedge$  (ET) et  $\vee$  (OU). La suite logique doit être complètement développée pour les  $\vee$ , de manière à minimiser le nombre de  $\wedge$ . Nous avons donc une représentation de l'arbre sous la forme  $\wedge[\vee_i Fu^{i,j}]$ . Ensuite autant de sous-ensembles sont créés qu'il y a de monaux, chaque sous-ensemble correspondant à un monal  $[\vee_i Fu^{i,j}]$ .



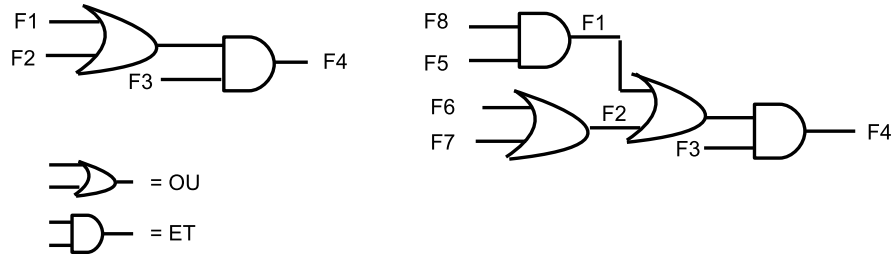


FIGURE 2.7 – Arbre des fonctions

**Exemple.** Soient les arbres des fonctions présentés sur la figure 2.7.

La traduction sous forme logique de l'arbre des fonctions de gauche serait :

$$F4 = ((F1 \vee F2) \wedge F3) \vee F4 = (F1 \vee F2 \vee F4) \wedge (F3 \vee F4)$$

Nous obtenons une formule constituée de deux blocs. Alors l'ensemble  $\mathcal{AF}$  est divisé en deux sous-ensembles de la manière suivante :

$$\mathcal{AF} = \{\{F1, F2, F4\}, \{F3, F4\}\}$$

Des ensembles de fonctions critiques possibles à un instant  $t$  sont construits en choisissant une fonction dans chacun des sous-ensembles, par exemple  $\mathcal{FU}_c(t) = \{F1, F4\}$  ou  $\mathcal{FU}_c(t) = \{F2, F3\}$  ou encore  $\mathcal{FU}_c(t) = \{F4\}$ .

Si l'on considère l'arbre des fonctions de droite, il s'écrit :

$$F4 = ((F1 \vee F2) \wedge F3) \vee F4 = ((F1 \vee F2 \vee F4) \wedge (F3 \vee F4)) \text{ avec}$$

$$F1 = (F8 \wedge F5) \vee F1 = (F8 \vee F1) \wedge (F5 \vee F1) \text{ et } F2 = F6 \vee F7 \vee F2$$

$$\text{d'où : } F4 = (F1 \vee F2 \vee F4) \wedge (F3 \vee F4)$$

$$F4 = (((F8 \vee F1) \wedge (F5 \vee F1)) \vee (F6 \vee F2 \vee F7) \vee F8) \wedge (F3 \vee F4)$$

$$F4 = (F8 \vee F1 \vee F6 \vee F2 \vee F7 \vee F4) \wedge (F5 \vee F1 \vee F6 \vee F2 \vee F7 \vee F4) \wedge (F3 \vee F8)$$

$$\text{D'où : } \mathcal{AF} = \{\{F8, F1, F6, F2, F7, F4\}, \{F5, F1, F6, F2, F7, F4\}, \{F3, F8\}\}$$

On peut en déduire plusieurs ensembles de fonctions critiques, par exemple  $\mathcal{FU}_c(t) = \{F8, F5, F3\}$ .

## 2.3.4 Le lien entre le modèle de vieillissement et le modèle de performance

### 2.3.4.1 Lien entre faute et défaillance

Comme nous l'avons vu, les endommagements induisent des pertes de performance. Cependant la présence d'une faute n'est pas synonyme de la présence d'une défaillance. La défaillance concerne uniquement l'aspect fonctionnel du composant via le paramètre de sortie, alors que la faute est intrinsèque au composant via le paramètre privé. Un composant défaillant n'est pas forcément en faute, des entrées anormales peuvent en effet entraîner des pertes de performance. De même, un composant en faute n'est pas forcément défaillant, par exemple s'il existe des redondances matérielles au sein d'un composant ou si une entrée erronée vient compenser un endommagement (par régulation).

### 2.3.4.2 Seuil de faute

Un équipement est en faute lorsqu'un endommagement dépasse un certain seuil. Cela se modélise par des seuils dits de faute pour les endommagements. Pour définir la valeur du seuil de faute d'un endommagement  $e^{i,j}$ , on considère que seul le paramètre privé associé est endommagé, tous

les autres paramètres privés et d'entrée étant nominaux. Le seuil de faute  $e_f^{i,j}$  correspond en fait à un seuil pour lequel la faute se manifeste par une défaillance dans le cas où il n'y a qu'un seul endommagement dans le composant :

$$e_f^{i,j} = \min(e^{i,j}(t)) \mid [(e^{i,j}(t) \geq e_f^{i,j}) \wedge (\forall pp^{i,l} \in \text{Supp}(Fu^{i,k}) \setminus pp^{i,j}, e^{i,l}(t) = 0)] \Rightarrow Av(Fu^{i,k}, t) = 0 \quad (2.33)$$

Dans le cas de fautes progressives, l'endommagement  $e^{i,j}$  évolue progressivement vers  $e_f^{i,j}$ . On peut définir des seuils de dégradation successifs correspondant à des seuils de perte de performance  $e_{d1}^{i,j} \dots e_{dm}^{i,j}$ .

Lorsque l'équipement a plusieurs endommagements de natures différentes, leurs effets peuvent se cumuler et la défaillance peut arriver avant la faute. Ceci est bien modélisé car dans le cas où plusieurs endommagements  $e^{i,j1}, e^{i,j2}, \dots$  correspondant aux paramètres privés  $pp^{i,j1}, pp^{i,j2}, \dots$  du support d'une fonction  $Fu^{i,k}$  augmentent en même temps, les effets sur  $op^{i,k}$  se cumulent via la relation analytique  $ar^{i,k}$ , il est donc possible qu'une défaillance se produise avant que l'un des endommagements  $e^{i,j}$  ait franchi le seuil de faute  $e_f^{i,j}$  dont la valeur est fixée en considérant qu'il y a un unique endommagement.

### 2.3.4.3 Temps restant avant la faute et temps restant avant la défaillance

Le pronostic de santé s'attache à déterminer le temps restant avant la faute, alors que le pronostic fonctionnel s'attache à déterminer le temps restant avant la défaillance. Ces deux durées sont intéressantes pour planifier les opérations de maintenance.

Le temps restant avant la défaillance, habituellement appelé *rtf* pour *remaining time to failure*, est défini comme :

$$rtf(Fu^{i,k}, t) = t_p^{i,k} - t \quad (2.34)$$

où l'instant de défaillance  $t_p^{i,k}$  est le plus petit instant tel que  $Av(Fu^{i,k}, t) = 0$ . L'instant de faute  $t_f^{i,k}$  est le plus petit instant tel que  $e^{i,k}(t) \geq e_f^{i,k}$ . Cette définition ne considère pas les défaillances intermittentes mais son extension ne pose pas de problème ;  $t_f^{i,k}$  est le plus petit instant tel que  $def^{i,k}(t) \geq def_f^{i,k}$  pendant une période de temps suffisamment longue :

$$(\exists [t_1, t_2] \mid \forall t \in [t_1, t_2], def^{i,k}(t) \geq def_f^{i,k}) \Leftarrow t_f^{i,k} = t_1 \quad (2.35)$$

Un récapitulatif sur les notations des instants de dégradation, de faute, de panne, diagnostiqués ou pronostiqués, est présenté sur la figure 2.8. Cela souligne les différences entre diagnostic/pronostic fonctionnel et diagnostic/pronostic de santé.

Représentons les différentes lois de vieillissement introduites dans le chapitre 1 dans le cadre du modèle générique avec ces nouvelles notations. Dans le cas de la méthode statistique, suivant les informations obtenues par expérience et essais, on peut disposer de plusieurs fonctions de densité de probabilité  $f_d$  correspondant à plusieurs seuils d'endommagement, ou alors de la fonction de densité de probabilité correspondant à la fin de vie utile.

En intégrant la fonction de densité de probabilité, on obtient la probabilité à un instant  $t$  que l'endommagement  $e^{i,j}$  ait atteint une valeur seuil  $e_1^{i,j}$ , ou alors la probabilité de fin de vie utile.

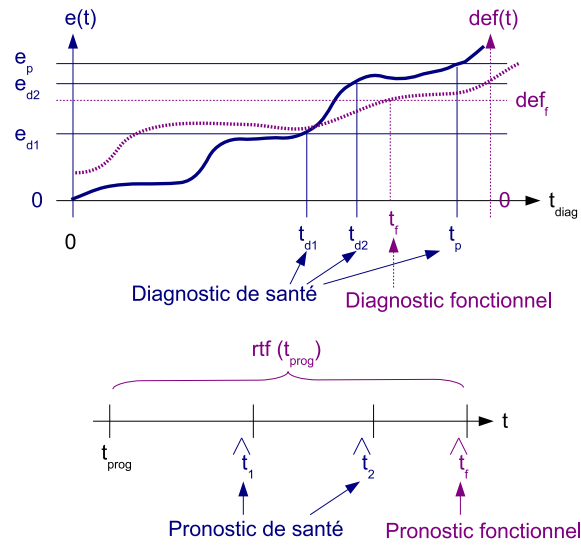


FIGURE 2.8 – Notations adoptées pour les instants et durées liées aux pertes de fonctions et aux pannes des composants.

$$P(e^{i,j} \geq e_1^{i,j}, t) = \int_0^t f_d(u) du \quad (2.36)$$

La figure 2.9 représente la manière d'évaluer la probabilité que l'endommagement soit supérieur au seuil  $e_1^{i,j}$  dans le futur, à partir de la connaissance d'une loi de vieillissement de la forme d'une densité de probabilité.

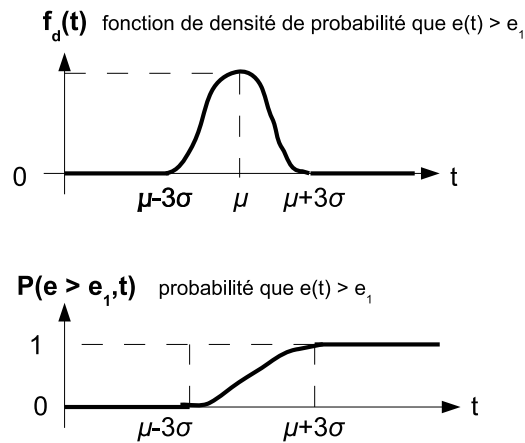


FIGURE 2.9 – Fonction de densité de probabilité et probabilité que l'endommagement atteigne un seuil donné  $e_1$  aux instants futurs.

Avec la méthode basée sur les lois physiques, si l'on souhaite connaître l'instant  $t_1$  où l'endommagement a une valeur  $e_1^{i,j}$ , on se sert simplement de la loi de vieillissement physique  $ag(df^i, t_1) = e_1^{i,j}$ .

Si l'on souhaite prendre en compte les incertitudes sur  $df^i$ , on définit alors un intervalle temporel  $[t_{min}, t_{max}]$  correspondant à la plage de taux d'endommagement  $[df_{min}^i, df_{max}^i]$ . La loi  $ag$  étant croissante,  $t_1 \in [t_{df_{min}^i}, t_{df_{max}^i}]$ . Les bornes min et max sont définies comme  $t_{min} = t \mid ag(df_{max}^{i,j}, t) = e_1^{i,j}$  et  $t_{max} = t \mid ag(df_{min}^{i,j}, t) = e_1^{i,j}$ .

On peut toujours se placer dans un contexte probabiliste. Alors nous considérons que la fonction de densité de probabilité  $f_d$  que l'endommagement ait la valeur  $e_1$  à un instant  $t$  suivra une loi uniforme ou encore une loi Gaussienne sur cet intervalle. La forme de la loi dépend de la forme des informations sur les facteurs d'endommagement. La probabilité  $P(e^{i,j}(t) \geq e_1^{i,j}, t)$  que l'endommagement  $e^{i,j}$  ait atteint la valeur  $e_1^{i,j}$  à un quelconque instant  $t$  est là encore définie comme l'intégrale de 0 à  $t$  de cette fonction de densité de probabilité  $f_d$ .

La figure 2.10 représente les étapes pour évaluer la probabilité que l'endommagement dépasse le seuil à partir de la connaissance des futures valeurs des facteurs d'endommagement et de la loi de vieillissement physique.

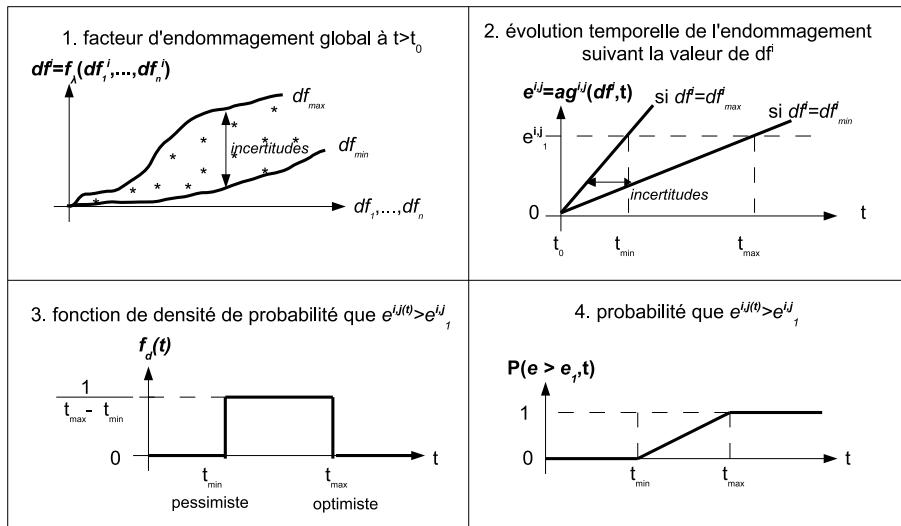


FIGURE 2.10 – facteur d'endommagement global, loi de vieillissement et incertitudes ; probabilité de franchissement de seuil pour l'endommagement.

## 2.4 Modèle complet du système sur trois niveaux

L'état de santé d'un composant  $HS^i(t)$  est défini comme :

$$HS^i(t) = (e^{i,1}, \dots, e^{i,k}) \quad (2.37)$$

De même l'état de santé du système  $\Sigma$  est

$$HS^\Sigma(t) = (HS^1(t), \dots, HS^n(t)) \quad (2.38)$$

L'état fonctionnel d'un composant est défini comme :

$$AV^i(t) = (def^{i,1}, \dots, def^{i,j}) \quad (2.39)$$

et l'état fonctionnel du système est :

$$AV^\Sigma(t) = (AV^1(t), \dots, AV^m(t)) \quad (2.40)$$

Comme le montre la figure 2.11, le cadre générique créé pour modéliser la vie des équipements peut être composé de trois niveaux.

- Le niveau "relations fonctionnelles et structure". Il s'agit du modèle structurel et fonctionnel du système. Ce niveau représente les interactions entre les composants et avec l'extérieur, et les relations entre les différents paramètres du système. Les valeurs des paramètres d'entrée et de sortie sont fixées. En général, les méthodes classiques de diagnostic à base de modèles sont construites uniquement sur ce niveau, puisque c'est celui-ci qui fait apparaître le modèle analytique de l'objet considéré.
- Le niveau "vieillessement". C'est dans ce niveau qu'apparaissent les facteurs d'endommagement et les lois de vieillissement et de rétroaction. Les valeurs des paramètres privés sont fixées, et elles seront imposées identiques dans le niveau structurel et fonctionnel. Les seuils de dégradation et les seuils de faute sont fixés. Ce niveau, que nous avons choisi de rajouter, permettra de faire du diagnostic et du pronostic de santé.
- Le niveau "performance et défaillance". C'est dans celui-ci que les seuils liés aux défaillances sont fixés, et comparés avec les valeurs des paramètres de sortie. Ce niveau permet de faire du diagnostic voire du pronostic fonctionnel.

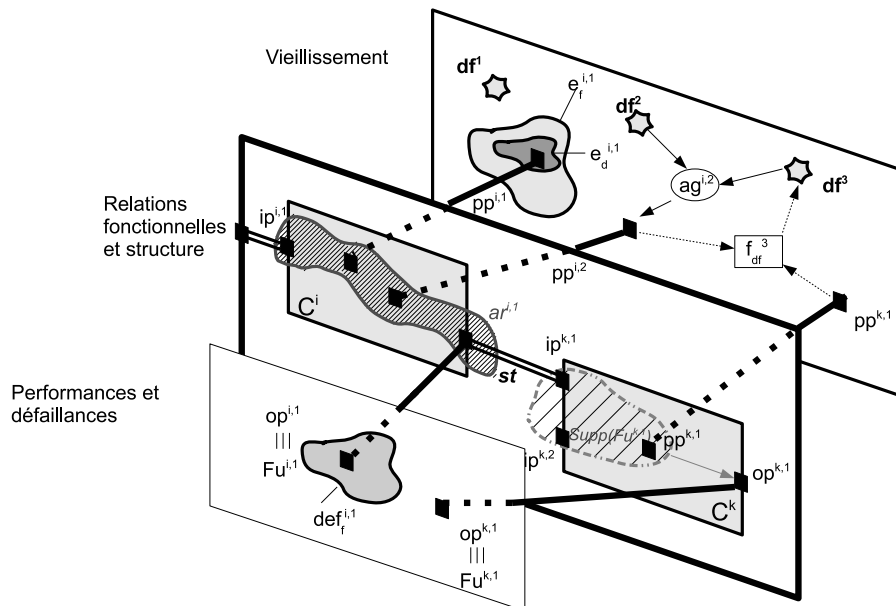


FIGURE 2.11 – Les trois niveaux du cadre de modélisation

Au moment de la mise en œuvre, il faut des critères de sélection des facteurs d'endommagement considérés puisqu'une exhaustivité est impossible de par la complexité des phénomènes décrits. Les facteurs d'endommagement doivent être :

- possible à observer, estimer, reconstruire, même de manière approximative ou via un encadrement ;

- assez exhaustifs pour justifier à eux seuls le vieillissement du système ;
- liés seulement aux opérations et à la vie du système, et non pas à la conception, à la manufacture, ou aux opérations de maintenance.

On connaît leur valeur sous forme de valeur numérique, ou de niveaux quantitatifs ou qualitatifs.

## Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art nous fait prendre conscience du besoin de développer une méthode formelle de suivi de l'état de santé d'un système complexe. Nous décidons d'appuyer cette méthode sur un cadre générique de modélisation de la vie d'un équipement.

Ce chapitre vise à décrire et justifier le cadre de modélisation. Tout d'abord la modélisation fonctionnelle et structurelle permet de représenter le comportement du système à tout instant de sa vie. Puis la modélisation du vieillissement permet de représenter l'évolution de l'état de santé du système au cours de sa vie en fonction de son utilisation. Enfin la modélisation des performances et défaillances montre les répercussions de l'état de santé du système sur son état fonctionnel.

Le chapitre suivant est la construction d'une méthode formelle de diagnostic et pronostic basée sur ce cadre de modélisation à trois niveaux.





**Résumé :** dans ce chapitre, à partir du modèle présenté dans le chapitre 2, des modes sont créés pour représenter les différents comportements anticipés du système et de ses composants (nominaux, dégradés, en faute). L'ensemble de ces modes est représenté sous forme d'automate, les chemins de l'automate des modes représentant les modes de vieillissement du système ou de ses composants. La méthode et les algorithmes de Health-Monitoring basés sur les modes sont développés. Nous montrons ensuite comment notre cadre permet de représenter et de préciser les concepts de métriques de performance, d'incertitudes, de diagnosticabilité et de pronosticabilité.

## Introduction

Nous avons construit dans le chapitre 2 un cadre générique de modélisation contenant toutes les informations utiles au diagnostic et au pronostic dans l'objectif de construire une méthode formelle de Health-Monitoring à base de modèle. Dans ce chapitre nous voyons tout d'abord comment des modes peuvent être définis pour représenter les différents comportements anticipés du système et de ses composants, puis nous représentons ces modes sous forme d'automate. A partir de là, nous construisons la méthode et les algorithmes de Health-Monitoring. Nous discutons ensuite des métriques de performance pour le diagnostic et le pronostic, et proposons une manière d'évaluer les incertitudes des résultats de pronostic. Pour finir, nous abordons le thème de la diagnosticabilité et de la pronosticabilité d'un système.

## 3.1 Modélisation des comportements du système

Le comportement d'un système ou d'un composant est défini par son mode qui représente son état de santé et par sa configuration qui représente les sollicitations dues à l'environnement.

### 3.1.1 Les modes des composants

#### 3.1.1.1 Définition des modes

Des modes sont définis pour représenter les différents états de santé connus des composants d'un système, et par extension l'état de santé du système. Les différences entre plusieurs modes sont modélisées par des rangs spécifiques. Une partition de l'espace des rangs des paramètres est donc réalisée pour définir les modes.



Un mode  $m_x^i \in \mathcal{M}^i$  est défini comme  $\langle \mathcal{C}^i, \mathcal{R}_x^i \rangle$  où :

- $\mathcal{C}^i = \langle \mathcal{P}^i, \mathcal{A}^i \rangle$  est l'ensemble des paramètres et des relations du modèle du composant ;
- $\mathcal{R}_x^i = \{r_x(p^{i,k})\} \subseteq \mathcal{R}^i$  est l'ensemble des rangs des paramètres de  $\mathcal{P}^i$  dans le mode  $m_x^i$ .

**Définition 28** (Mode d'un composant).  $\mathcal{C}^i$  est dans le mode  $m_x^i$  à l'instant  $t$  se définit par :  
 $\mathcal{C}^i \equiv m_x^i \Leftrightarrow \forall p^{i,k} \in \mathcal{P}^i, v(p^{i,k}, t) \in r_x(p^{i,k})$ .

### 3.1.1.2 Les catégories de mode

Plusieurs catégories de modes sont définies pour permettre de représenter les différents états de santé du composant : le mode nominal, les modes dégradés, et les modes de fautes.

1. Le mode nominal  $m_n^i$  est défini comme le mode dans lequel tous les endommagements sont inférieurs au plus petit seuil de dégradation  $e_{d1}^{i,k}$ . Par conséquent, toutes les fonctions sont disponibles. Le rang d'un paramètre  $p$  dans ce mode est noté  $r_n(p)$ . Le mode nominal est donc défini par  $m_n^i = \langle \mathcal{C}^i, \mathcal{R}_n^i \rangle$ , et

$$\mathcal{C}^i \equiv m_n^i \Leftrightarrow p^{i,k} \in \mathcal{P}^i, v(p^{i,k}, t) \in r_n(p^{i,k}). \quad (3.1)$$

Pour les paramètres privés,  $r_n(pp^{i,k}) = \{v(pp^{i,k}, t) \in r(pp^{i,k}) \mid e^{i,k} \leq e_{d1}^{i,k}\}$ .

2. Les modes dégradés  $m_d^i$  sont définis comme les modes dans lesquels l'un au moins des paramètres privés a sa valeur hors rang nominal mais aucun endommagement n'a dépassé le seuil de faute. Les rangs des paramètres sont notés  $r_{dk}(p)$  où  $dk$  est le  $k^{ieme}$  seuil de dégradation franchi. Le mode dégradé est défini par  $m_d^i = \langle \mathcal{C}^i, \mathcal{R}_d^i \rangle$ , et

$$\mathcal{C}^i \equiv m_d^i \Leftrightarrow \exists pp^{i,j} \in \mathcal{PP}^i \mid e_{dk+1}^{i,j} \geq e^{i,j}(t) \geq e_{dk}^{i,j} \text{ et } \forall p^{i,k} \in \mathcal{P}^i, v(p^{i,k}, t) \in r_d(p^{i,k}). \quad (3.2)$$

Pour les paramètres privés,  $r_{dk}(pp^{i,k}) = \{v(pp^{i,k}, t) \mid e_{dk+1}^{i,k} \leq e^{i,k}(t) \leq e_{dk}^{i,k}\}$ .

3. Les modes de faute  $m_f^i$  sont définis comme les modes dans lesquels au moins un des endommagements a dépassé le seuil de faute. Les rangs des paramètres dans ce mode sont notés  $r_f(p)$ . Le mode de faute est défini par  $m_f^i = \langle \mathcal{C}^i, \mathcal{R}_f^i \rangle$ , et

$$\mathcal{C}^i \equiv m_f^i \Leftrightarrow \exists pp^{i,j} \in \mathcal{PP}^i, e^{i,j}(t) \geq e_f^{i,j} \text{ et } \forall p^{i,k} \in \mathcal{P}^i, v(p^{i,k}, t) \in r_f(p^{i,k}). \quad (3.3)$$

### 3.1.1.3 La configuration d'un composant

La configuration d'un composant représente les sollicitations externes qu'il reçoit. Elle est définie grâce aux valeurs de ses paramètres d'entrée. La configuration est dite normale si tous les paramètres d'entrée sont dans des rangs nominaux (attendus par l'utilisateur pour un comportement nominal), anormale sinon.  $\mathcal{C}^i$  est en configuration anormale à l'instant  $t$  équivaut à :

$$\exists p^{i,j} \in \mathcal{IP}^i, v(ip^{i,j}, t) \notin r_n(ip^{i,j}) \cup r_f(ip^{i,j}). \quad (3.4)$$

La sollicitation anormale du composant est due à un comportement anormal de son environnement, peut être lié au vieillissement de composants du système et notamment d'un composant qui lui est structurellement lié.

*Exemple.* Considérons la pompe, dont la fonction est de transformer la vitesse  $\Omega$  en débit  $Q$ . Lorsque  $\Omega$ ,  $Q$ , et  $Cyl$  sont dans leurs rangs nominaux, l'état de santé est nominal, et la pompe

est en mode nominal.

Lorsque  $Cyl$  a diminué en-deça du seuil de panne à cause du vieillissement de la pompe, l'impact sur  $Q = Cyl \times \Omega$  implique la non-disponibilité de la fonction, et la pompe est en mode de faute. Lorsque l'entrée  $\Omega$  n'est pas nominale, alors la pompe est en configuration anormale. Cela peut cacher un mode nominal ou un mode de faute. Si le débit diminue, on ne peut pas savoir si c'est lié à une diminution de la cylindrée (signe d'un endommagement) ou de la vitesse de rotation (signe d'une entrée anormale).

### 3.1.2 Les modes du système

Le mode du système  $\Sigma = \langle C^1, C^2, \dots, C^n \rangle$  est constitué de l'ensemble des modes de ses composants :

$$m_x^\Sigma = \langle m_{x1}^1, m_{x2}^2, \dots, m_{xn}^n \rangle \quad (3.5)$$

avec  $m_x^\Sigma \in \mathcal{M}^\Sigma$  et  $\mathcal{M}^\Sigma = \mathcal{M}^1 \times \mathcal{M}^2 \times \dots \times \mathcal{M}^n$ .

De la même manière que pour les composants plusieurs catégories de modes sont définies :

-  $\Sigma$  est en mode nominal  $m_n^\Sigma$  à l'instant  $t$  si tous les composants sont en mode nominal :

$$\forall C^i \in \Sigma, \forall p^{i,k} \in \mathcal{P}^i, v(p^{i,k}, t) \in r_n(p^{i,k}); \quad (3.6)$$

-  $\Sigma$  est en mode dégradé  $m_d^\Sigma$  à l'instant  $t$  si aucun de ses composants n'est en mode de faute mais au moins un de ses composants est en mode dégradé :

$$\exists C^i \in \Sigma, \exists pp^{i,j} \in \mathcal{P}\mathcal{P}^i \mid e_f^{i,j} \geq e^{i,j}(t) \geq e_{dm}^{i,j} \text{ et } \forall p^{i,k} \in \mathcal{P}^i \quad v(p^{i,k}, t) \in r_d(p^{i,k}); \quad (3.7)$$

-  $\Sigma$  est en mode de faute  $m_f^\Sigma$  à l'instant  $t$  si au moins un de ses composants est en mode de faute

$$\exists C^i \in \Sigma, \exists pp^{i,j} \in \mathcal{P}\mathcal{P}^i \mid e_f^{i,j}(t) \geq e_f^{i,j} \text{ et } \forall p^{i,k} \in \mathcal{P}^i \quad v(p^{i,k}, t) \in r_f(p^{i,k}); \quad (3.8)$$

Enfin,  $\Sigma$  est en configuration anormale à l'instant  $t$  si l'un de ses paramètres d'entrée lié structurellement avec  $\mathcal{E}^\Sigma$  est hors de son rang nominal :

$$\exists C^i \in \Sigma, \exists ip^{i,k} \in \mathcal{P}^i \mid ip^{i,k} = st(op^{\mathcal{E}^\Sigma, j}) \text{ et } v(ip^{i,k}, t) \notin r_n(ip^{i,k}) \bigcup r_f(ip^{i,k}). \quad (3.9)$$

*Exemple.* Considérons le système pompe+moteur, avec la causalité suivante : le moteur fournit une vitesse de rotation à la pompe qui la transforme en débit.

- lorsque pompe et moteur sont en mode nominal, le système moto-pompe est en mode nominal;
- lorsque le moteur est en faute, cela impacte la disponibilité de sa fonction élémentaire, et donc la disponibilité de la fonction objectif qui est une combinaison des fonctions élémentaires des deux composants. Le système moto-pompe est alors en mode de faute. De la même manière, lorsque la pompe est en mode de faute, le système moto-pompe est en mode de faute;
- lorsque le moteur est en configuration anormale, le système est sollicité de manière non nominale, il est donc en configuration anormale;
- si la seule information disponible est que la pompe est en configuration anormale, c'est-à-dire lorsque  $\Omega$  n'est pas nominal, cela provient du fait que la sortie du moteur n'est pas nominale, donc que soit le moteur est en mode de faute, soit il est en configuration anormale.

### 3.1.3 La trajectoire des modes et le suivi de l'état de santé

Nous avons vu que les variations des paramètres privés permettent de représenter l'endommagement du composant, et que ces variations sont monotones. Dans le cas de pannes progressives, ces variations sont continues.

En général l'endommagement est nul au début de la vie du composant, puis il dépasse un seuil nominal (un ou plusieurs paramètres privés sortent du rang nominal), et le composant est en mode dégradé. L'endommagement continue à augmenter et peut dépasser d'autres seuils de dégradation, le composant changeant de mode dégradé. Enfin lorsque l'endommagement dépasse le seuil de faute, le composant entre en mode de faute. Au cours de sa vie, le composant réalise donc une trajectoire dans l'espace des modes, de nominal vers dégradé puis vers mode de faute. Cette trajectoire représente un mode de vieillissement du composant. Il y a autant de trajectoires que de modes de vieillissement possibles.

Tandis que le composant poursuit son parcours dans l'itinéraire, la configuration peut passer de normale à anormale, en cas de sortie du rang nominal de l'un des paramètres d'entrée. Cela arrive en cas de sollicitation anormale par l'environnement ou en cas de faute de l'un des composants du système.

Les différents modes contiennent les informations nécessaires pour définir les endommagements et les pertes de performance, et donc l'état de santé et l'état fonctionnel du composant.

## 3.2 Représentation des modes du système sous forme d'automate

Des automates des modes sont construits pour représenter les différents modes des composants et du système, et les modes de vieillissement.

### 3.2.1 L'automate des modes des composants

Dans un objectif de généralité, une modélisation compositionnelle du système est choisie, qui consiste à modéliser chaque composant par un automate puis à spécifier une loi de composition des modèles pour en déduire le modèle du système.

L'automate des modes du composant  $\mathcal{C}^i$  est défini par le 4-tuple  $A^i : (X^i, E^i, T^i, x_0^i)$  où :

- $X^i = \{x_x^i\}$  est un ensemble fini d'états ;
- $E^i = \{ev_j^i\}$  est un ensemble fini d'évènements ;
- $T^i = \{\delta^i\}$  est un ensemble fini de fonctions de transition de  $X^i \times E^i$  dans  $X^i$  qui à un état et un évènement associe l'état suivant ;
- $x_0^i$  est l'état initial de l'automate.

**Les états.** Les états  $x_x^i$  correspondent aux modes  $m_x^i$  de  $\mathcal{C}^i$  durant sa vie opérationnelle. L'état initial  $x_0^i$  correspond au mode nominal  $m_n^i$ .

**Les évènements.** Les évènements modélisent un changement d'état de l'automate des modes dès lors que la condition associée est réalisée. Ce sont les évènements qui entraînent un changement du mode représentant le comportement de  $C^i$ . Ils ont donc deux formes différentes :

- les évènements "faute/dégradation", lorsque l'un des endommagements dépasse un seuil de dégradation ou de faute, le prochain état est associé à un mode dégradé ou à un mode de faute. L'évènement  $ev$  est produit dès que  $e(t) \geq e_d$  ou  $e_f$ ,
- les évènements "entrée anormale" lorsque l'un des paramètres d'entrée sort de son rang nominal, le prochain état associé est associé à un mode dans une configuration anormale. L'évènement  $ev$  est produit dès que  $ip(t)$  sort de  $r_n(ip)$ .

**Les transitions.** Lorsque un évènement se produit (dégradation/faute, ou entrée anormale), le mode représentant le comportement du composant change. Ceci est modélisé comme un changement d'état dans l'automate des modes. La fonction de transition permet de représenter le comportement de l'automate des modes lorsqu'un évènement survient à partir d'un état donné. Par exemple lorsque l'automate est dans un état  $x_m^i$  et qu'un évènement  $ev \in E^i$  se produit, cela peut provoquer une évolution vers l'état cible  $x_n^i$  par la transition associée à l'évènement  $ev$ . La fonction de transition  $\delta^i$  est définie comme :

$$\begin{cases} \delta^i : X^i \times E^i \longrightarrow X^i \\ (x_n^i, ev_j^i) \longmapsto x_m^i = \delta^i(x_n^i, ev_j^i) \end{cases} \quad (3.10)$$

L'automate ne change pas de mode si aucune fonction de transition associée à  $x_n^i$  et  $ev_j^i$  n'est définie.

### 3.2.2 L'automate des modes du système

L'automate des modes du système  $\Sigma$  est le produit parallèle des automates des modes de ses composants :

$$A^\Sigma = A^1 || A^2 \dots || A^N \quad (3.11)$$

C'est donc le 4-tuple :  $A^\Sigma = (X, E, T, x_0)$  où :

- $X \subseteq X^1 \times \dots \times X^n$  est un ensemble fini d'états accessibles ;
- $E \subseteq \bigcup_{i=1}^n E^i$  est un ensemble fini d'évènements ;
- $T = \{\delta\}$  est un ensemble fini de fonctions de transition de  $X \times E$  dans  $X$  qui à un état et un évènement associe l'état suivant ;
- $x_0 = (x_0^1 \dots x_0^n)$  est l'état initial de l'automate.

#### 3.2.2.1 Le produit parallèle des automates des composants

La fonction de transition de l'automate global du système est obtenue grâce au produit parallèle des automates locaux.

**Le produit parallèle de deux automates** Pour commencer simplement, considérons le produit parallèle de deux automates locaux  $A^1$  et  $A^2$  pour former l'automate global  $A$ . Soit l'état global synchronisé  $X = (x_1, x_2)$  où  $x_1$  est l'état local de  $A^1$  et  $x_2$  est l'état local de  $A^2$ . La fonction de transition pour un évènement  $ev$  à partir de cet état  $X$  dépend du cas de figure :

- si l'évènement  $ev$  est commun aux deux automates locaux  $A^1$  et  $A^2$ , et si les deux fonctions de transition  $\delta^1(x_1, ev)$  et  $\delta^2(x_2, ev)$  sont définies, alors les deux transitions sont franchies simultanément, les deux automates évoluent de manière synchronisée.
- si l'évènement n'appartient qu'à un seul automate et que la transition associée est définie, cette transition est franchie et seul cet automate évolue.
- dans tous les autres cas, aucune transition n'est franchie et les automates n'évoluent pas.

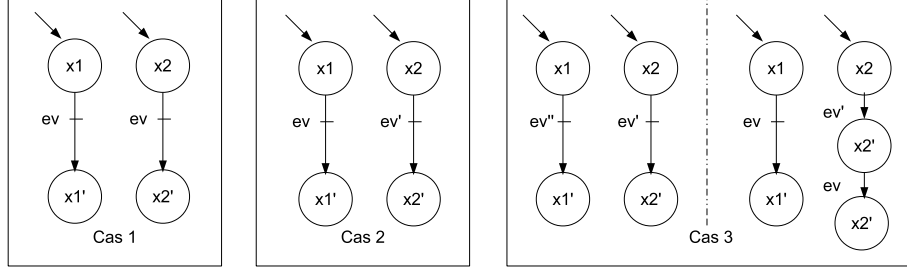


FIGURE 3.1 – Trois cas pour illustrer le franchissement de transition suite à l'évènement  $ev$  dans deux automates synchronisés.

Ceci est illustré sur la figure 3.1. Dans le cas 1, l'évènement  $ev$  est partagé par  $A^1$  et  $A^2$  et les deux transitions sont définies à partir des états  $x_1$  et  $x_2$ , donc la transition globale est  $\delta((x_1, x_2), ev) = (x_1', x_2')$ . Dans le cas 2 l'évènement  $ev$  est propre à  $A^1$  donc seul  $A^1$  évolue et la transition globale est  $\delta((x_1, x_2), ev) = (x_1', x_2)$ . Le cas 3 illustre deux exemples où les automates n'évoluent pas. Pour le cas de gauche l'évènement  $ev$  n'appartient à aucun automate, donc aucune transition n'est franchie, et la transition globale est  $\delta((x_1, x_2), ev) = (x_1, x_2)$ . Pour le cas de droite, l'évènement  $ev$  appartient bien aux deux automates  $A^1$  et  $A^2$ , mais la transition n'est définie que pour l'état  $x_1$  de l'automate  $A^1$ , donc la transition globale est là encore  $\delta((x_1, x_2), ev) = (x_1, x_2)$ .

La fonction de transition globale pour le produit parallèle de deux automates est formellement définie de la manière suivante :

$$\delta((x_1, x_2), ev) = \begin{cases} (\delta^1(x_1, ev), \delta^2(x_2, ev)) & \text{si } (\delta^1 \text{ définie} \wedge \delta^2 \text{ définie}) \\ (\delta^1(x_1, ev), x_2) & \text{si } (\delta^1 \text{ définie}) \wedge (ev \notin E^2) \\ (x_1, \delta^2(x_2, ev)) & \text{si } (\delta^2 \text{ définie}) \wedge (ev \notin E^1) \\ (x_1, x_2) & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.12)$$

$E^1 \cap E^2$  représente l'ensemble des évènements partagés par les deux automates locaux. Grâce au produit parallèle ces évènements sont synchronisés.

Introduisons l'ensemble  $E_{sync}(ev)$  qui contient tous les automates  $A^i$  auxquels appartient  $ev$ . Il y a alors 4 cas de figure :

- si  $ev$  n'appartient qu'à  $E^1$ ,  $E_{sync}(ev) = \{A^1\}$
- si  $ev$  n'appartient qu'à  $E^2$ ,  $E_{sync}(ev) = \{A^2\}$
- si  $ev$  est un évènement partagé,  $E_{sync}(ev) = \{A^1, A^2\}$
- si  $ev$  n'est un évènement ni de  $A^1$  ni de  $A^2$ ,  $E_{sync}(ev) = \{\emptyset\}$

Alors la fonction de transition globale peut s'écrire :

$$\delta((x_1, x_2), ev) = (y_1, y_2) \text{ o} \forall i \in \{1, 2\} \ y_i = \begin{cases} \delta^i(x_i, ev) & \text{si } (\forall E^j \mid A^j \in E_{sync}(ev), \delta^j(x_j, ev) \text{ définie}) \\ x_i & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.13)$$

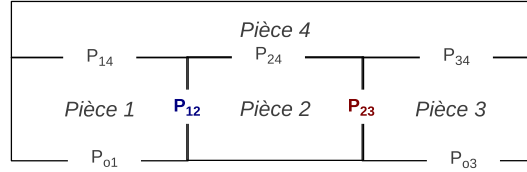


FIGURE 3.2 – Structure du bâtiment

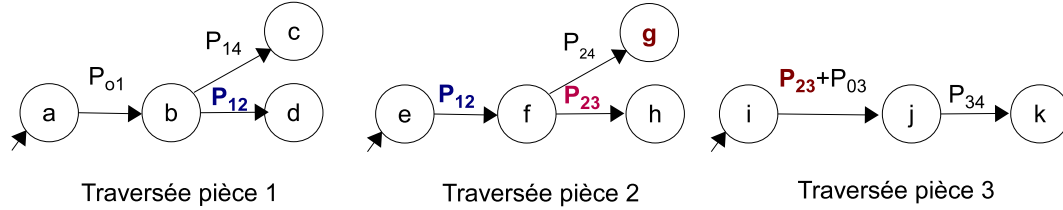


FIGURE 3.3 – Automates modélisant les traversées des pièces 1, 2 et 3

**Généralisation au produit parallèle de plusieurs automates** On souhaite généraliser ce résultat au produit parallèle de plusieurs automates locaux et de plusieurs événements. Il y a là encore plusieurs cas de figure pour la définition de la fonction de transition globale. Pour chaque événement  $ev$  l'ensemble  $E_{sync}(ev)$  est construit. Il comprend exactement tous les automates  $A^i$  tels que l'évènement  $ev \in E^i$  :

$$E_{sync}(ev) = \{A^i \mid ev \in E^i\} \quad (3.14)$$

Notons  $X = x^\Sigma = (x_1 \dots x_n)$  et  $Y = y^\Sigma = (y_1 \dots y_n)$ . La fonction de transition globale  $\delta$  pour un état  $X$  et un évènement  $ev$  est alors définie de la manière suivante :

$$\delta(X, ev) = Y \text{ avec } \forall i \in [1 \dots n] \quad (3.15)$$

$$y_i = \begin{cases} \delta^i(x_i, ev) & \text{si } (\forall E^j \mid A^j \in E_{sync}(ev), \delta^j(x_j, ev) \text{ définie}) \\ x_i & \text{sinon} \end{cases}$$

**Exemple.** Considérons la structure du bâtiment de la figure 3.2, et représentons l'accès à la pièce 4. Dans notre exemple, rajoutons qu'à tout instant une seule personne cherche à accéder à la pièce 4 et que, dans sa logique, elle progresse toujours vers l'avant ou vers la droite. La traversée de chaque pièce est modélisable individuellement. Par exemple, la traversée de la pièce 1 se traduit par deux séquences possibles :  $P_{01} \cdot (P_{14} + P_{12})$ . Les automates représentant les trois traversées sont montrés sur la figure 3.3. Nous remarquons que les événements  $P_{12}$  et  $P_{23}$  apparaissent dans deux automates. Ceci traduit simplement le fait que lorsque la personne quitte la pièce 1 par l'ouverture  $P_{12}$ , elle pénètre simultanément dans la pièce 2 par la même ouverture (même chose entre les pièces 2 et 3). L'évènement  $P_{12}$  ne peut en aucun cas se produire sur un automate et pas sur l'autre car cela ne modéliserait pas du tout le phénomène réel. Il s'agit donc d'évènements synchronisés. On obtient l'automate global en effectuant le produit parallèle des trois automates individuels, comme présenté sur la figure 3.4.

### 3.2.2.2 Les évènements synchronisés

L'intérêt de former l'automate du système à partir des automates composants est de pouvoir représenter à la fois

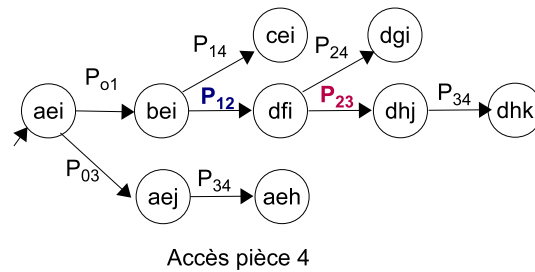


FIGURE 3.4 – Automate modélisant l'accès à la pièce 4

- les états de santé de chaque composant, ce qui est fait grâce aux événements liés aux valeurs d'endommagement ;
- l'aspect structurel et la propagation de pertes de performances dans le système, ce qui est fait grâce aux événements liés aux valeurs des paramètres d'entrée.

La structure du système entraîne une synchronisation des événements puisque les valeurs des paramètres structurellement connectés sont toujours égales. Pour représenter les événements liés aux valeurs des paramètres d'entrée nous utilisons des événements synchronisés.

Nous définissons les événements synchronisés comme suit. Un événement synchronisé se produit dès que  $v(ip, t)$  sort de  $r_n(ip)$ . Si  $ip = st(op)$ , alors cet événement sera synchronisé avec l'événement qui se produit dès que  $v(op, t)$  sort de  $r_n(ip)$ . Alors, l'automate contenant le paramètre  $ip$  passe dans un état correspondant à un mode en configuration anormale, et l'automate contenant le paramètre  $op$  reste dans le même mode. Si le paramètre de sortie est structurellement connecté à plusieurs paramètres d'entrée, plusieurs événements synchronisés sont créés.

A chaque événement de synchronisation est associé un automate dit de synchronisation. Ensuite pour obtenir l'automate complet du composant, il s'agit de faire le produit parallèle de son automate des modes (où les événements sont liés aux endommagements et aux sollicitations anormales) et de tous les automates de synchronisation créés pour ses paramètres de sortie.

La figure 3.5 montre un exemple de synchronisation des automates de deux composants  $\mathcal{C}^1$  et  $\mathcal{C}^2$  structurellement liés via  $ip^2 = st(op^1)$ . Le composant  $\mathcal{C}^1$  a deux paramètres privés  $pp^1$  et  $pp^2$ , auxquels correspondent respectivement les seuils d'endommagement  $ev_d^1$  et  $ev_p^1$ , et  $ev_p^2$ . Un événement  $ev^2$  est associé à la sortie du rang nominal pour  $ip^2$ , c'est un événement synchronisé avec la sortie du même rang pour  $op^1$ . Les deux automates de santé de  $\mathcal{C}^1$  et  $\mathcal{C}^2$  sont créés. Le fait que  $ip^2 = st(op^1)$  entraîne la nécessité de synchroniser  $\mathcal{C}^1$  et  $\mathcal{C}^2$  en créant un automate de synchronisation pour  $\mathcal{C}^2$  où l'événement  $ev^2$  reboucle sur un même état. L'automate complet de  $\mathcal{C}^1$  est construit comme le produit parallèle de son automate de santé et de l'automate de synchronisation. Ensuite l'automate du système  $\Sigma = \{\mathcal{C}^1, \mathcal{C}^2\}$  est construit comme le produit parallèle des automates complets des composants.

### 3.2.3 La construction des automates des modes

Lorsqu'un composant change de mode, il s'agit d'un événement instantané, mais les paramètres ne changent pas de valeur instantanément. Pour permettre de représenter cette continuité dans le vieillissement, deux modes successifs pour un composant ont des valeurs communes pour les

rangs de tous leurs paramètres :

$$x_y^i = \delta(x_x^i, ev_j^i) \Rightarrow (\forall p^{i,k} \in \mathcal{P}^i, r_x(p^{i,k}) \cap r_y(p^{i,k}) \neq \emptyset) \quad (3.16)$$

Cela permet de déterminer quels modes peuvent être successifs ou ne pas l'être à partir de la connaissance des rangs. Ensuite les événements sont définis pour représenter les dépassements de seuils de dégradation ou de faute. Ils sont créés pour chaque composant de l'équipement, de manière à former la base de l'automate du composant.

Puis les événements synchronisés sont définis pour tous les paramètres d'entrée, et pour tous les paramètres qui leur sont structurellement liés grâce à *st*. Cela permet de compléter les événements de l'automate des modes composant avec les événements synchronisés.

La construction de l'automate du système se base sur le produit parallèle des automates des composants et sur la synchronisation des événements des automates des composants. L'automate des modes du système est composé de l'ensemble des modes du système, et des événements de tous les composants, dont certains sont synchronisés.

## Conclusion

Dans cette section une manière de représenter le modèle de la vie de l'équipement sous forme d'automate des modes a été présentée. Les automates des modes hybrides servent souvent à représenter le comportement des systèmes complexes (voir par exemple [Hen96] ou [ZF06]), cependant dans notre définition des automates nous ne représentons pas seulement le comportement. Comme nous avons défini les modes à partir des rangs des paramètres, qui sont liés à la physique des fautes, ces automates des modes ont une signification physique. Un mode est directement lié à un état de santé et un état fonctionnel. Un changement de mode dans l'automate des modes correspond à une évolution bien définie et effectivement possible d'un endommagement.



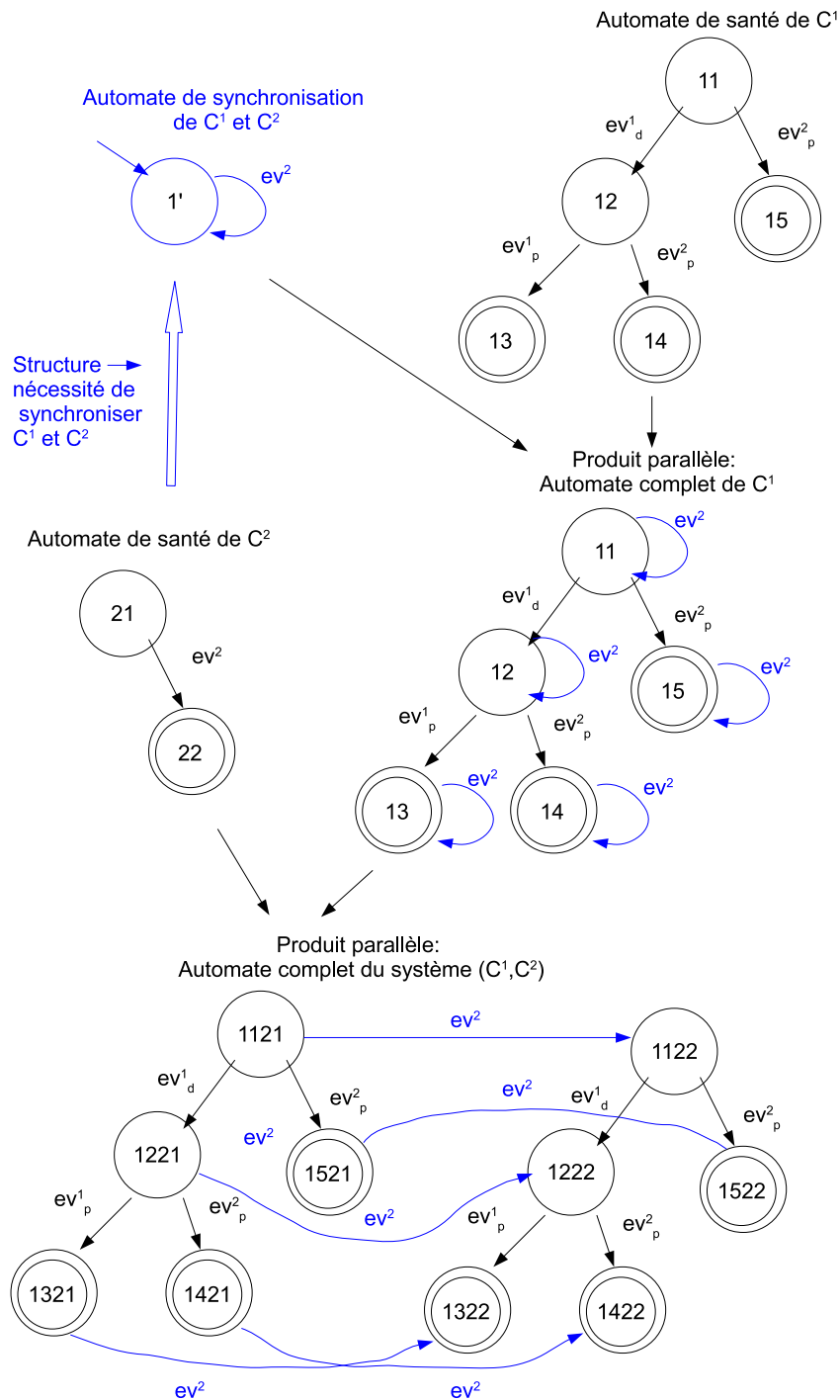


FIGURE 3.5 – Exemple de synchronisation des automates de deux composants structurellement connectés.

### 3.3 Détermination de l'état de santé du système

#### 3.3.1 Les définitions basées sur notre cadre générique

Lions les définitions du diagnostic et du pronostic au modèle formel que nous avons développé et présenté dans ce chapitre et dans le chapitre 2.

##### 3.3.1.1 Diagnostic

Nous avons défini les modes de manière à ce qu'ils représentent l'état de santé de l'équipement. Chaque mode correspond à des niveaux d'endommagement, et donc à des niveaux de pertes de performance, et des défaillances. Le diagnostic est lié à la détermination du mode qui représente le comportement de l'équipement à l'instant courant.

Avec le formalisme que nous avons développé, le diagnostic de santé revient à déterminer quel(s) paramètre(s) privé(s)  $pp^{i,j}$  varie(nt), et quelles sont les valeurs des endommagements  $e^{i,j}$ . Le diagnostic fonctionnel revient à établir les conséquences de l'état de santé sur les pertes de performances  $def^{i,k}$ , pour évaluer les disponibilités des fonctions  $Av(Fu^{i,k})$ .

Le résultat du diagnostic local  $\Delta^i(t)$  est l'ensemble des modes  $m_x^i$  qui peuvent représenter le comportement du composant  $\mathcal{C}^i$  à l'instant  $t$  (voir la définition 28), l'état de santé  $HS^i(t)$  et l'état fonctionnel  $AV^i(t)$ . Le résultat du diagnostic global  $\Delta^\Sigma(t)$  est l'ensemble des modes du système  $m_x^\Sigma(t)$ , des états de santé  $HS^\Sigma(t)$  et des états fonctionnels  $AV^\Sigma(t)$  qui peuvent représenter le comportement du système  $\Sigma$  à l'instant  $t$ .

Le diagnostic global utilise les résultats des diagnostic locaux :

$$\begin{aligned} m_x^\Sigma(t) &\in (\Delta^1(t) \times \dots \times \Delta^n(t)) \cap \mathcal{MC}^\Sigma, \\ HS^\Sigma(t) &= \langle E^\Sigma(t), AV^\Sigma(t) \rangle \\ \text{avec } E^\Sigma(t) &= [[E^1(t)]^T \dots [E^n(t)]^T]^T, \\ \text{et } AV^\Sigma(t) &= [[AV^1(t)]^T \dots [AV^n(t)]^T]^T. \end{aligned}$$

$\mathcal{MC}^\Sigma$  est l'ensemble des modes systèmes composés de modes composants tels que toutes les paires de modes  $(m_x^i, m_y^j)$  de  $m_x^\Sigma$  sont consistantes. C'est l'ensemble des modes systèmes possibles. Cela traduit une contrainte liée à la structure : deux composants  $\mathcal{C}^i$  et  $\mathcal{C}^j$  structurellement liés ne peuvent être à un instant  $t$  que dans des modes  $m_x^i$  et  $m_y^j$  qui permettent aux paramètres structurellement liés  $op^{i,1}$  et  $ip^{j,1}$  d'avoir la même valeur à cet instant  $t$  :  $v(op^{i,1}, t) = v(ip^{j,1}, t)$ . Cela se traduit par une intersection non nulle au niveau des rangs de ces paramètres dans ces modes :  $r_x^i(op^{i,1}) \cap r_y^j(ip^{j,1}) \neq \emptyset$ .

$$\begin{aligned} m_x^\Sigma = \langle m_{x1}^1, m_{x2}^2, \dots, m_{xN}^N \rangle \in \mathcal{MC}^\Sigma &\Leftrightarrow \\ \forall (m_{xi}^i, m_{xj}^j) \in m_x^\Sigma, \forall (p^{i,k}, p^{j,l}) | p^{i,k} = st(p^{j,l}), r_{xi}(p^{i,k}) \cap r_{xj}(p^{j,l}) &\neq \emptyset \end{aligned} \quad (3.17)$$

### 3.3.1.2 Pronostic

Le pronostic de santé est la prédiction de l'évolution des valeurs des endommagements  $e^{i,j}$  via les lois de vieillissement  $ag^{i,j}$ , et de l'évolution des facteurs d'endommagement  $df_l^i$ . Cela permet de calculer l'instant  $\hat{t}_x \in [t_{x\hat{min}}, t_{x\hat{max}}]$ , où le prochain seuil de dégradation  $e_d^{i,j}$  ou seuil de panne  $e_p^{i,j}$  sera franchi.

Le pronostic fonctionnel est la prédiction de l'évolution des pertes de performance  $def^{i,k}$ . Cela permet de prédire la date de la fin de vie utile  $\hat{t}_f \in [t_{f\hat{min}}, t_{f\hat{max}}]$ .

Il y a plusieurs notions dans le pronostic :

- les prochains changements de modes,
- l'état de santé et l'état fonctionnel associés,
- les futurs instants de dégradation ou faute (i.e. les instants de changement de mode),
- les futurs instants de défaillance (ou le RUL), qui sont déduits de l'état fonctionnel.

Au vu de la similitude entre les opérations de diagnostic et pronostic, nous choisissons de réaliser le pronostic comme une suite de diagnostics, les diagnostics étant réalisés aux dates des futurs changements de mode prédits  $\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_f$ .

Le résultat de pronostic local à l'instant  $t$  est donc  $\Pi^i(t) = \{\Delta^i(t), \Delta^i(\hat{t}_1), \Delta^i(\hat{t}_2), \dots, \Delta^i(\hat{t}_f)\}$ , où  $\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots$  sont les instants prédits de prochains changements de mode composant, et  $\hat{t}_f$  est l'instant prédit de fin de vie utile du composant  $\mathcal{C}^i$ .

Le pronostic global à l'instant  $t$  est  $\Pi^\Sigma(t) = \{\Delta^\Sigma(t), \Delta^\Sigma(\hat{t}_1), \Delta^\Sigma(\hat{t}_2), \dots, \Delta^\Sigma(\hat{t}_f)\}$ , où  $\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots$  sont les instants prédits de prochains changements de mode système, et  $\hat{t}_f$  est l'instant prédit de fin de vie utile du système  $\Sigma$ .

Nous avons vu que pour gérer les incertitudes, les lois de vieillissement renvoient non pas une date, mais un intervalle temporel  $[t_{\hat{min}}, t_{\hat{max}}]$ . L'instant de franchissement de seuil est ensuite choisi dans cet intervalle temporel. On aurait pu choisir la borne minimale ou la borne maximale, mais conformément à la bibliographie présentée dans la section 1.4.4, nous choisissons de travailler avec un aspect probabiliste. Pour choisir l'instant  $\hat{t}_x \in [t_{\hat{min}}, t_{\hat{max}}]$ , une probabilité  $P_{max}$  est fixée pour chaque endommagement. L'instant  $\hat{t}_x$  est tel que  $P(e^{i,j} \geq e_x^{i,j}, \hat{t}_x) = P_{max}(e^{i,j})$ . Par exemple,  $P_{max} = 90\%$  signifie que l'instant  $\hat{t}_x$  est celui pour lequel il y a 90% de chance que l'endommagement ait dépassé le seuil d'après la PDF. La valeur de  $P_{max}$  est fixée relativement à la criticité de la faute et des défaillances liées à l'endommagement. Plus la faute est critique, plus le seuil est bas, et inversement. La figure 3.6 illustre cette notion de seuil de probabilité  $P_{max}$ .

### 3.3.2 Les algorithmes

Le déroulement des opérations de détermination de l'état de santé de l'équipement consiste à le surveiller, diagnostiquer l'état courant, et pronostiquer les états futurs pour obtenir le temps restant avant les prochaines fautes et le temps restant avant les prochaines défaillances. Ces opérations sont présentées plus en détail dans les sections suivantes.

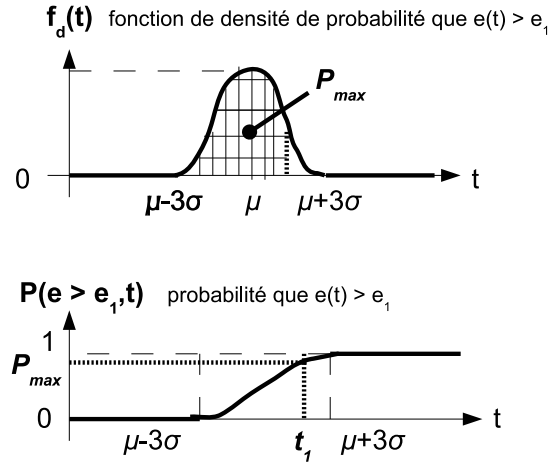


FIGURE 3.6 – Fonction de densité de probabilité et probabilité que l'endommagement atteigne un seuil donné  $e_1$  aux instants futurs.

### 3.3.2.1 Observations

Les observations correspondent aux valeurs connues des paramètres et des facteurs d'endommagement, par exemple mesurées par des capteurs. Les ensembles de paramètres  $\mathcal{P}^i$  et de facteurs d'endommagement  $\mathcal{D}^i$  sont constitués d'une partie observable et d'une partie non observable :

$$\mathcal{P}^i = \mathcal{P}_{obs}^i \cup \mathcal{P}_{non-obs}^i, \quad \mathcal{D}^i = \mathcal{D}_{obs}^i \cup \mathcal{D}_{non-obs}^i \quad (3.18)$$

L'observation associée à un paramètre ou un facteur d'endommagement observable sa valeur mesurée par le capteur, sous forme de rang  $r_{obs}$  pour gérer les incertitudes sur les capteurs :

$$p^{i,j} \in \mathcal{P}_{obs}^i \Rightarrow v(p^{i,j}, t) \in r_{obs}(p^{i,j}, t) \quad (3.19)$$

On dira également que des paramètres dont la valeur peut être déduite des relations fonctionnelles grâce à l'observabilité d'autres paramètres sont observables.

**Définition 29** (observable). *Un paramètre observable est un paramètre dont la valeur est connue à l'instant présent avec une précision quantifiable.*

Dans ses travaux [Bel12] analyse les raisons qui peuvent conduire à un diagnostic erroné, à savoir des erreurs dans les capteurs (qui entraîne de mauvaises observations), des erreurs dans les modèles ou un mauvais algorithme de diagnostic. Dans notre cas nous prenons l'hypothèse que les observations sont justes, elles reflètent bien la vraie valeur des paramètres modélisés, et que le modèle est correct.

L'algorithme 1 décrit l'observation du système  $\Sigma$ .

### 3.3.2.2 Prédictions

De la même manière que certains paramètres sont observables, nous introduisons ici le concept de paramètres prédictibles.

---

**Algorithme 1** *Observation*

---

Entrée :  $\Sigma, t$   
 Sortie :  $\{obs\}$   
**pour tous**  $p^{i,j} \in \mathcal{P}_{obs}^i$  **faire**  
      $r(p^{i,j}) = r_{obs}(p^{i,j}, t)$   
**fin pour**  
 $\{obs\} \leftarrow \{r(p^{i,j})\}$   
 Retourner  $\{obs\}$

---

**Définition 30** (prédictible). *Un paramètre prédictible est un paramètre dont la valeur est connue dans le futur avec une précision quantifiable.*

Les ensembles des paramètres et des facteurs d'endommagement sont constitués d'une partie prédictible et d'une partie non prédictible :

$$\mathcal{P}^i = \mathcal{P}_{pred}^i \cup \mathcal{P}_{\neg pred}^i, \quad \mathcal{D}^i = \mathcal{D}_{pred}^i \cup \mathcal{D}_{\neg pred}^i \quad (3.20)$$

La prédiction associée à un paramètre ou un facteur d'endommagement prédictible son rang prédit  $r_{pred}$  :

$$p^{i,j} \in \mathcal{P}_{pred}^i \Rightarrow v(p^{i,j}, t) \in r_{pred}(p^{i,j}, t) \quad (3.21)$$

Les outils privilégiés pour l'observation sont les capteurs. Pour la prédiction, les outils sont principalement les lois de vieillissement et les lois de rétroaction.

- les paramètres privés sont prédits grâce aux lois de vieillissement  $ag$  et aux facteurs d'endommagement de leurs supports :

$$pp^{i,j} \in \mathcal{P}_{pred}^i \Leftrightarrow (ag^{i,j} \text{ définie}) \wedge (\forall df_l^i \in Supp(ag^{i,j}), df_l^i \in \mathcal{D}_{pred}^i), \quad (3.22)$$

- les paramètres d'entrée sont prédits grâce à la prédictibilité du paramètre auquel ils sont structurellement liés (paramètre de sortie d'un autre composant ou de l'environnement) :

$$ip^{i,j} \in \mathcal{P}_{pred}^i \Leftrightarrow \exists op^{k,l} \in \mathcal{P}_{pred}^k \mid ip^{i,j} = st(op^{k,l}), \quad (3.23)$$

- les facteurs d'endommagement sont prédits grâce aux fonctions de rétroaction sur les facteurs d'endommagement  $f_{df}$  et aux paramètres privés de leur support :

$$df_l^i \in \mathcal{D}_{pred}^i \Leftrightarrow (f_{df_l^i} \text{ définie}) \wedge (\forall pp^{i,j} \in Supp(f_{df_l^i}), pp^{i,j} \in \mathcal{P}_{pred}^i), \quad (3.24)$$

- les paramètres de sortie d'un composant sont prédits grâce à la prédictibilité des paramètres privés et des paramètres d'entrée du support de la fonction associée :

$$op^{i,k} \in \mathcal{P}_{pred}^i \Leftrightarrow \forall p^{i,j} \in Supp(Fu^{i,k}), p^{i,j} \in \mathcal{P}_{pred}, \quad (3.25)$$

- enfin, les paramètres de sortie de l'environnement sont prédits grâce à la connaissance de la configuration future  $\mathcal{E}^\Sigma$ .

La prédictibilité des paramètres privés dépend de la prédictibilité de facteurs d'endommagement, qui dépend elle-même de la prédictibilité de paramètres privés. Cependant, à l'instant de la prédiction, les rangs des facteurs d'endommagement sont déterminés dans le mode diagnostiqué,

et ils sont invariables tant que le composant reste dans ce mode. L'évolution future des valeurs des paramètres privés est alors prédite grâce aux lois de vieillissement. Dès qu'un seuil de dégradation ou de faute est dépassé par l'un des paramètres privés, il y a un changement de mode, et les rangs des facteurs d'endommagement sont mis à jour dans ce mode grâce aux lois de rétroaction.

Pour ce qui est de la prédiction des paramètres d'entrée et sortie, il y a également un ordre à respecter. Les composants du système peuvent être classifiés en couches pour obtenir un ordre de propagation des transformations depuis l'entrée jusqu'à la sortie du système. Les couches sont définies comme suit.

**Définition 31** (Couches). *Les couches des composants  $C^i \in \Sigma$  sont définies comme suit :*

$$\text{couche}(C^i) = 1 \Leftrightarrow \forall ip \in \mathcal{IP}^i, ip \in \mathcal{IP}^\Sigma$$

$$\text{couche}(C^i) = k \Leftrightarrow (\exists ip \in \mathcal{IP}^i, ip = st(op) \text{ avec } op \in \mathcal{OP}^j \text{ et } \text{couche}(C^j) = k - 1) \wedge (\forall ip \in \mathcal{IP}^i, ip = st(op) \text{ avec } op \in \mathcal{OP}^j \text{ et } \text{couche}(C^j) \leq k - 1)$$

$$\text{couche}(C^i) = z, z > k \Leftrightarrow (\exists ip \in \mathcal{IP}^i, ip = st(op) \text{ avec } op \in \mathcal{OP}^j \text{ et } \text{couche}(C^j) = z).$$

**Exemple.** Ceci est illustré dans la figure 3.7. Le composant  $C^1$  appartient à la couche 1 car ses entrées sont des entrées du système. Le composant  $C^2$  appartient à la couche 2 car ses entrées sont des sorties de la couche 1. Le composant  $C^5$  appartient à la couche 3 car ses entrées sont des sorties de la couche 2 ou des entrées du système. Enfin les composants  $C^3$  et  $C^4$  appartiennent à la dernière couche, la couche 4, du fait du bouclage.

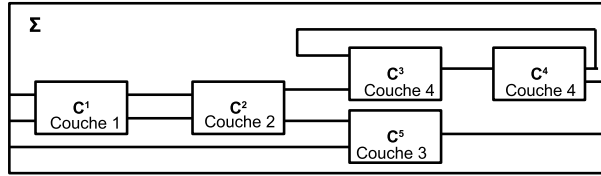


FIGURE 3.7 – Illustration de la notion de couches dans le système.

L'algorithme 2 décrit les opérations de prédiction des paramètres et facteurs d'endommagement du système  $\Sigma$ . Les paramètres d'entrée des composants de la couche 1 sont prédits grâce aux prévisions sur la configuration future du système, les paramètres de sortie en sont déduits. Puis plus généralement les paramètres d'entrée des composants de la couche  $k$  sont prédits grâce aux prédictions des paramètres de sortie des composants de la couche  $k - 1$ .

### 3.3.2.3 Les résidus

Nous avons vu dans le chapitre 1 que les résidus représentent l'écart entre la réalité et un modèle. Les résidus sont des outils qui servent à déterminer quel mode représente le comportement d'un composant à un instant  $t$ . Nous construisons nos résidus comme des combinaisons de paramètres, ils sont ainsi rattachés au modèle. Ils ont un rang théorique connu dans les différents modes du composant, qui est déduit des rangs des paramètres qui les composent. Ensuite, les valeurs réelles des résidus à l'instant  $t$  sont obtenues, et, par comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs théoriques, les modes de santé pouvant correspondre au comportement du composant sont déduits.

Nous définissons donc les résidus comme suit.

**Définition 32** (résidu). *Les résidus sont des combinaisons de paramètres. Ils permettent d'associer un mode système à l'état de santé réel de l'équipement à un instant  $t$ , car ils prennent des*

**Algorithme 2** Prediction
 

---

Entrée :  $\Sigma, t, \{r(df_l^i)\}$   
 Sortie :  $\{pred\}$   
**pour tous**  $pp^{i,j} \in \mathcal{PP}_{pred}^i$  **faire**  
      $r(pp^{i,j}) = ag^{i,j}(\{df_l^i\})$   
**fin pour**  
 $k \leftarrow 1$   
**tant que**  $k \leq nb - couches(\Sigma)$  **faire**  
     **pour tous**  $C^i \mid couche(C^i) = k$  **faire**  
         **pour tous**  $ip^{i,j} \in \mathcal{IP}_{pred}^i$  **faire**  
              $v(ip^{i,j}, t) = v(op^{k,l}, t)$   
         **fin pour**  
         **pour tous**  $op^{i,j} \in \mathcal{OP}_{pred}^i$  **faire**  
              $v(op^{i,j}, t) = ar(\{p^{i,k}\})$   
         **fin pour**  
     **fin pour**  
      $k \leftarrow k + 1$   
**fin tant que**  
 $\{pred\} \leftarrow \{v(p^{i,j}, t)\}$   
 Retourner  $\{pred\}$

---

valeurs particulières suivant l'état de santé de l'équipement.

Les résidus pour le diagnostic doivent être observables. L'ensemble des résidus observables est  $Res_{obs}^i$ . Les résidus observables sont une combinaison de paramètres observables du composant :

$$\begin{cases} f^i : P(\mathcal{P}_{obs}^i \cup \mathcal{D}_{obs}^i) \longrightarrow Res_{obs}^i \\ (p^{i,j}, \dots, p^{i,k}) \longmapsto \rho^i = f^i(p^{i,j}, \dots, p^{i,k}). \end{cases} \quad (3.26)$$

Ce sont les résidus tels qu'on les retrouve dans la littérature liée au diagnostic. Par extension nous définissons de nouveaux résidus pour le pronostic, ils doivent être prédictibles. L'ensemble des résidus prédictibles est  $Res_{pred}^i$ . Les résidus prédictibles sont une combinaison de paramètres prédictibles du composant :

$$\begin{cases} f^i : P(\mathcal{P}_{obs}^i \cup \mathcal{D}_{obs}^i) \longrightarrow Res_{pred}^i \\ (p^{i,j}, \dots, p^{i,k}) \longmapsto \rho^i = f^i(p^{i,j}, \dots, p^{i,k}). \end{cases} \quad (3.27)$$

Les deux ensembles  $Res_{obs}^i$  et  $Res_{pred}^i$  ne sont pas forcément identiques ni disjoints.

L'algorithme 3 permet de calculer les valeurs des résidus à partir des entrées (observations ou prédictions) et de la connaissance des relations fonctionnelles. L'algorithme 4 établit ensuite la compatibilité entre les valeurs des résidus et les modes connus du composant.

La construction des résidus est expliquée en détails dans [Coc04], à travers deux méthodes, les relations de redondance analytiques et les observateurs d'état. Dans nos travaux, la construction de résidus consiste à manipuler les différentes relations fonctionnelles et les relations associées aux fonctions de rétroaction pour faire disparaître tous les paramètres non observables ou non prédictibles.

**Algorithme 3** *Calcul – résidus*


---

Entrée :  $\{p\}$   
Sortie :  $\{\rho_{obs}\}$   
**pour tous**  $\rho_j^i \in Res_{obs}^i$  **faire**  
     $r(\rho_j^i) = f^i(\{p\})$   
**fin pour**  
 $\{\rho_{obs}\} \leftarrow \{r(\rho_j^i)\}$   
Retourner  $\{\rho_{obs}\}$

---

**Algorithme 4** *Modes – compatibles*


---

Entrée :  $\{\rho_{obs}\}, \Sigma$   
Sortie :  $\Delta^i$   
**pour tous**  $m_x^i \in \mathcal{M}^i$  **faire**  
    **si**  $\forall \rho_k^i \in \{\rho_{obs}\}, r(\rho_k^i) \cap r_x^i \neq \emptyset$  **alors**  
         $mc \leftarrow +m_x^i$   
    **fin si**  
**fin pour**  
Retourner  $mc$

---

Les résidus sont choisis de manière à être sensibles à l'évolution de paramètres sélectionnés. La sensibilité d'un résidu à un paramètre s'évalue par la variation de la valeur du résidu lorsqu'il y a variation de la valeur du paramètre.

La sensibilité du résidu  $\rho$  au paramètre  $p$  est estimée comme :

$$s(\rho, p) = \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (3.28)$$

En général, on cherche à estimer la sensibilité d'un résidu à un paramètre privé qui modélise une faute. On peut aussi vouloir estimer la sensibilité d'un résidu à un paramètre de sortie pour quantifier l'impact d'une perte de performance non observable sur le résidu observable.

Le résidu idéal est sensible à un seul paramètre. Deux méthodes d'amélioration des résidus sont proposées dans la littérature :

- les résidus structurés, qui influencent seulement certains sous-espaces de l'espace résiduel, chaque résidu étant sensible seulement à un sous-ensemble de fautes. Ils sont présentés dans [Ger98] et [CMS04] ;
- les résidus directionnels, dont la direction dans l'espace résiduel est fixée pour chaque faute, la longueur du vecteur dépendant de la taille de la faute. Ils sont présentés dans [HSA94].

**3.3.2.4 Le diagnostic**

Le diagnostic du système est réalisé selon l'algorithme 5. Les résidus sont calculés et les modes des composants compatibles avec les résidus sont proposés comme diagnostic locaux. Les diagnostics locaux sont fusionnés pour réaliser le diagnostic global (voir l'algorithme 6). Les algorithmes 7 et 8 permettent ensuite d'évaluer l'état de santé et l'état fonctionnel du composant à partir des observations et de la connaissance du mode. La distance  $d$  d'un paramètre à un rang est définie



comme :

$$d(p, r(p)) = \begin{cases} 0 & \text{si } p \in r(p) \\ \min(d(p, x), x \in r(p)) & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.29)$$

Les autres distances possibles sont définies en annexe 6. Enfin l'algorithme 9 permet de mettre à jour les ensembles de fonctions critiques à la fin du diagnostic. La mise à jour des ensembles de fonctions critiques se fait dès lors qu'une fonction n'est plus disponible. Un ensemble de fonctions critiques est choisi au départ. Lorsque l'une des fonctions de cet ensemble n'est plus disponible, une nouvelle fonction du même sous-ensemble est choisie parmi les fonctions disponibles de ce sous-ensemble. Si aucune fonction d'un sous-ensemble n'est disponible, cela signifie qu'au moins une fonction objectif du système n'est plus disponible, et donc que le RUL du système est à 0.

---

**Algorithme 5 Diagnostic**


---

Entrée :  $\Sigma, t, \{obs\}$   
 Sortie :  $[\Delta^\Sigma, HS, AV, \mathcal{FU}_c, RUL](t)$   
 Initialisation :  $RUL \leftarrow 1$   
**pour tous**  $\mathcal{C}^i \in \Sigma$  **faire**  
      $\{\rho_{obs}\} = \text{Calcul} - \text{residus}(\{obs\})$   
      $\Delta^i = \text{Modes} - \text{compatibles}(\{\rho_{obs}\}, \Sigma)$   
**fin pour**  
 $\Delta^\Sigma = \text{Fusion}(\{\Delta^i\}, \Sigma)$   
**pour tous**  $m_x^i \in \Delta^\Sigma$  **faire**  
      $HS = \text{Evaluation} - HS(\{obs\}, m_x^i)$   
      $AV = \text{Evaluation} - AV(\{obs\}, m_x^i)$   
      $\{\mathcal{FU}_c\} = \text{MaJ} - \text{fonctions} - \text{critiques}(AV)$   
     **si**  $\text{Card}(\{\mathcal{FU}_c\}) = 0$  **alors**  
          $RUL \leftarrow 0$   
     **fin si**  
**fin pour**  
 Retourner  $[\Delta^\Sigma, HS, AV, \{\mathcal{FU}_c\}, RUL]$

---



---

**Algorithme 6 Fusion**


---

Entrée :  $\{\Delta^i\}$ ,  
 Sortie :  $\Delta^\Sigma$   
**pour tous**  $m_x^\Sigma \in \Delta^1 \times \dots \times \Delta^n$  **faire**  
     **si**  $\forall (m_{xi}^i, m_{xj}^j) \in m_x^\Sigma, \forall (p^{i,k}, p^{j,l}) | p^{i,k} = st(p^{j,l}), r_{xi}(p^{i,k}) \cap r_{xj}(p^{j,l}) \neq \emptyset$  **alors**  
          $\Delta^\Sigma \leftarrow +m_x^\Sigma$   
     **fin si**  
**fin pour**  
 Retourner  $\Delta^\Sigma$

---

### 3.3.2.5 Le pronostic

Pour chaque composant il est possible de faire plusieurs pronostics locaux en fonction des hypothèses sur le diagnostic. Le pronostic global ou pronostic du système consiste à fusionner les pronostics locaux. Contrairement au diagnostic global qui se fait après les diagnostics locaux, afin

---

**Algorithme 7** *Evaluation – HS*

---

Entrée :  $\{obs\}, s_x^i$   
 Sortie :  $HS$   
**pour tous**  $pp^{i,k} \in \mathcal{P}_{obs}^i$  **faire**  
      $e^{i,j} \leftarrow d(pp_0^{i,j}, r(pp^{i,j}))$   
**fin pour**  
**pour tous**  $pp^{i,k} \in \mathcal{P}_{obs}^i$  **faire**  
      $e^{i,j} \leftarrow d(pp_0^{i,j}, r_x^i(pp^{i,j}))$   
**fin pour**  
 $HS \leftarrow \{e^{i,j}\}$   
 Retourner  $HS$

---



---

**Algorithme 8** *Evaluation – AV*

---

Entrée :  $\{obs\}, m_x^i$   
 Sortie :  $AV$   
**pour tous**  $op^{i,k} \in \mathcal{P}_{obs}^i$  **faire**  
      $def^{i,j} \leftarrow d(op_0^{i,j}, r(op^{i,j}))$   
**fin pour**  
**pour tous**  $op^{i,k} \in \mathcal{P}_{obs}^i$  **faire**  
      $def^{i,j} \leftarrow d(op_0^{i,j}, r_x^i(op^{i,j}))$   
**fin pour**  
 $AV \leftarrow \{def^{i,j}\}$   
 Retourner  $AV$

---



---

**Algorithme 9** *MaJ – fonctions – critiques*

---

Entrée :  $AV$   
 Sortie :  $\{\mathcal{FU}_c\}$   
**pour tous**  $\mathcal{FU}_c \in \{\mathcal{FU}_c\}$  **faire**  
     **si**  $\exists Fu^{j,k} \in \{\mathcal{FU}_c\} \mid Av(Fu^{j,k}) = 0$  **alors**  
          $\{\mathcal{FU}_c(t)\} \leftarrow \{\mathcal{FU}_c(t)\} \setminus \mathcal{FU}_c$   
     **fin si**  
**fin pour**  
 Retourner  $\{\mathcal{FU}_c(t)\}$

---

de considérer les propagations et rétroactions dans le système, les pronostics locaux et globaux sont calculés quasiment simultanément.

L'algorithme 10 permet de faire le pronostic global du système. Il se sert de l'algorithme 2 qui prédit les valeurs futures des paramètres. Il se sert aussi de l'algorithme 5, de diagnostic, car nous avons voulu insister sur le fait que les deux méthodes sont identiques, la différence entre diagnostic et pronostic résidant dans l'obtention des données d'entrée, qui peuvent être soit des observations soit des prédictions. Dans l'algorithme 10, une difficulté est de choisir une bonne valeur pour le pas d'itération  $\Delta t$ . S'il est trop petit, l'effort de calcul demandé sera trop important. S'il est trop grand, le résultat de pronostic risque de ne pas être assez précis. Dans l'idéal le pas devrait être adapté aux différents endommagements et aux formes des modèles (par exemple à la vitesse d'augmentation de l'endommagement), ainsi qu'à l'état de santé à l'instant considéré (par exemple un système avec un état de santé dégradé vieillira d'autant plus rapidement).

Nous voulons que le pronostic soit évolutif : il est réalisé à chaque fois qu'un changement de mode est détecté, afin de mettre à jour le pronostic avec les nouvelles informations disponibles. Si l'on a plusieurs hypothèses de diagnostic, un pronostic est réalisé par hypothèse.

La projection temporelle, qui est la plus grosse différence entre le pronostic et le diagnostic, implique que la connaissance disponible sur le système est souvent plus limitée pour le pronostic que pour le diagnostic. En effet, les observations en temps réel sont remplacées par les prédictions de paramètres, et les paramètres ne sont pas forcément les mêmes.

### 3.3.2.6 Le suivi de l'état de santé

L'algorithme 11 de suivi de l'état de santé se base sur les algorithmes précédemment présentés. Tout d'abord les observations du système sont récupérées (algorithme 1), puis un diagnostic est réalisé à l'instant courant (algorithme 5), et à partir des hypothèses de diagnostic, un pronostic est réalisé (algorithme 10).

L'appel à l'algorithme de suivi de l'état de santé est fait à intervalles de temps réguliers. Ces intervalles de temps dépendent de plusieurs facteurs :

- la stratégie de Health Monitoring : tests au sol en pré-vol, tests ponctuels en vol, suivi en continu de l'état de santé ;
- l'état de santé courant de l'équipement ;
- la progressivité des endommagements vis-à-vis de la dynamique du système ;
- la fréquence d'utilisation du système : certains composants sont utilisés très rarement comme les systèmes secours, d'autres une fois par vol, comme les freins, d'autres sont utilisés en continu pendant toute la durée du vol, comme les commandes de vol ;
- la criticité de l'application.

Ainsi, il est nécessaire de s'adapter aux applications, aux possibilités et aux exigences liées au Health Monitoring.

**Algorithme 10** *Pronostic*


---

Entrée :  $\Sigma, t, \Delta^\Sigma, \{P_{max}\}$   
 Sortie :  $\Pi^\Sigma(t)$   
 Initialisation :  $k \leftarrow 1$   
**tant que**  $RUL \neq 0$  **faire**  
    $t \leftarrow t + \Delta t$   
   **pour tous**  $m_x^\Sigma \in \Delta^\Sigma$  **faire**  
     **pour tous**  $pp^{i,k} \in \mathcal{PP}$  **faire**  
        $r(pp^{i,k}) = r_x^\Sigma(pp^{i,k})$   
     **fin pour**  
     **pour tous**  $df_l^i \in \mathcal{DF}$  **faire**  
        $r(df_l^i) = f_{df}(\{r(pp^{i,k})\})$   
     **fin pour**  
      $\{pred\} = Prediction(\Sigma, t, \{r(df_l^i)\})$   
     **pour tous**  $pp^{i,j} \in \mathcal{PP}_{pred}$  **faire**  
       **si**  $P(e^{i,j} \geq e_x^{i,j}, t) \geq P_{max}(e^{i,j})$  **alors**  
          $t_k \leftarrow t$   
         sortie de la boucle  
       **fin si**  
     **fin pour**  
     **si**  $t_k == t$  **alors**  
        $[\Delta^\Sigma, HS, AV, \mathcal{FU}_c, RUL](t_k) = (Diagnostic(\Sigma, t_k, \{pred\}))$   
        $\Pi^\Sigma(t) \leftarrow \Delta^\Sigma(t_k)$   
        $k \leftarrow k + 1$   
     **fin si**  
   **fin pour**  
**fin tant que**  
 Retourner  $\{\Pi^\Sigma\}$

---

**Algorithme 11** *Suivi – Etat – de – Sante*( $\Sigma, t$ )

---

Entrée :  $\Sigma, t$   
 Sortie :  $\Delta^\Sigma(t), \Pi^\Sigma(t)$   
 $\{obs(t)\} \leftarrow Observation(\Sigma, t)$   
 $[\Delta^\Sigma, HS, AV, \mathcal{FU}_c, RUL](t) = Diagnostic(\Sigma, t, \{obs(t)\})$   
 $\Pi^\Sigma(t) = Pronostic(\Sigma, t, \Delta^\Sigma(t))$   
 Retourner  $\{\Pi^\Sigma\}$

---

## 3.4 Concepts liés au diagnostic et au pronostic

Après avoir présenté l'algorithme de diagnostic et pronostic, nous nous attachons à montrer comment les différents concepts liés au diagnostic et au pronostic s'intègrent dans notre cadre et notre méthode.

### 3.4.1 Les métriques de performance du diagnostic et du pronostic

Les métriques de performance du diagnostic sont définies et couramment utilisées pour évaluer les méthodes de diagnostic. En revanche les efforts de recherche actuels dans le pronostic visent surtout à développer une méthode de pronostic capable de prédire le RUL d'un équipement, de générer un indice de confiance dans cette prédiction, et pouvant être intégrée avec des systèmes de diagnostic existant au préalable. Or il est important d'évaluer et de comparer les méthodes de pronostic grâce à des métriques de performance. Cette section vise à présenter les métriques proposées dans la littérature puis à en proposer certaines, que nous définissons à travers notre formalisme.

[SCB<sup>+</sup>01] propose une revue détaillée des métriques de pronostic. Elles dépendent de l'objectif à atteindre : la performance du pronostic peut être établie par rapport à un objectif de disponibilité de l'équipement, ou par rapport à un objectif de coût.

Pour la performance liée à la disponibilité du système on trouve les métriques suivantes :

- la précision, qui sera détaillée plus loin ;
- l'exactitude, également détaillée plus loin. Ce peut être un calcul d'erreur, ou un biais moyen sur toutes les erreurs commises pour les prédictions mises à jour au fur et à mesure ;
- l'horizon du pronostic : c'est la différence entre l'instant où l'indice de santé estimé diminue au-delà d'un seuil fixé et l'instant où la défaillance apparaît ([GD11]) ;
- la confiance que l'on peut avoir dans la prédiction effectuée ;
- la position de la fonction de densité de probabilité par rapport à la faute : avant, après, ou autour. [SCB<sup>+</sup>01] parle des faux positifs et des faux négatifs comme pour le diagnostic. Ils déterminent des bornes en dehors desquelles la prédiction n'est pas acceptable (trop tôt pour les faux positifs, trop tard pour les faux négatifs). Généralement les erreurs ne sont pas "symétriques" : prédire trop tôt n'a pas les mêmes conséquences que prédire trop tard ;
- la capacité à converger, qui évalue le fait que la prédiction est de plus en plus précise avec le temps [GD11] ;
- la robustesse aux changements d'entrée et aux perturbations extérieures ;
- le temps de calcul.

Si la performance est liée à l'évaluation économique de l'application du pronostic on trouve les métriques suivantes (toujours répertoriées dans [SCB<sup>+</sup>01] ou [GD11]) :

- le ratio entre la durée d'utilisation moyenne et la durée de vie estimée ;
- le LCC avec et sans le système de pronostic ;
- le retour sur investissement, c'est-à-dire la différence entre les bénéfices économiques réalisés et le coût de développement, d'installation, et de maintien du système de pronostic ;
- d'autres métriques qui associent le coût des fausses alarmes et des erreurs de prédiction et les bénéfices réalisés grâce aux bonnes prédictions.

Les deux métriques de performance les plus courantes dans la littérature sont l'exactitude et la précision. Nous les définirons ici à la fois pour le pronostic et pour le diagnostic. Pour cela posons

le cadre suivant, il y a deux mondes distincts :

- la réalité, avec un mode réel  $m_k$  et instant de défaillance réel  $t^k$ , qui ne sont pas forcément connus ;
- le monde du diagnostic et du pronostic avec un résultat de diagnostic  $\widehat{\Delta}_k$  composé de un ou plusieurs modes  $\{m_k^{diag}\}$ , et un ou plusieurs intervalles de temps estimés pour l'instant de défaillance  $[\widehat{t}_{min}^k, \widehat{t}_{max}^k]$ .

Les métriques de performance visent à comparer la réalité avec le monde du diagnostic et du pronostic.

### 3.4.1.1 Exactitude

Nous proposons la définition suivante pour l'exactitude du diagnostic.

**Définition 33** (diagnostic exact). *Un résultat de diagnostic est exact si toutes les hypothèses de diagnostic contiennent bien la faute ou la dégradation réelle.*

Soit  $m_k^i$  le mode réel du composant  $\mathcal{C}^i$  en faute. Le résultat du diagnostic se présente sous la forme d'un ensemble de modes systèmes  $\widehat{\Delta}_k = \{m_k^{diag}\}$ . Le résultat de diagnostic est exact si et seulement si  $\forall m_k^{diag} \in \widehat{\Delta}_k, m_k^i \in m_k^{diag}$ .

La définition de l'exactitude du pronostic est la suivante.

**Définition 34** (pronostic exact). *Un résultat de pronostic est exact si l'instant de défaillance réel appartient bien à l'intervalle prédit.*

Soit  $t^k$  l'instant réel de la défaillance k. La prédiction faite à l'instant  $t$  est proposée sous la forme d'un ou plusieurs intervalles de temps  $[\widehat{t}_{min}^{k,i}, \widehat{t}_{max}^{k,i}]$  où  $i$  est l'indice de l'intervalle s'il y en a plusieurs. Le résultat de pronostic est exact si et seulement si  $t^k \in \bigcap_i [\widehat{t}_{min}^{k,i}, \widehat{t}_{max}^{k,i}]$ .

Dans les définitions de l'exactitude, il y a une référence directe au monde réel, donc l'exactitude d'une prédiction ne peut pas forcément être déterminée avant la date prédite.

Le terme exactitude correspond au terme anglais " accuracy " dans la littérature, à ne pas confondre avec la précision, qui peut également se traduire par accuracy, mais dont l'acception est différente.

La quantification de l'exactitude peut être un calcul d'erreur, ou un biais moyen sur toutes les erreurs commises pour les prédictions mises à jour au fur et à mesure

En général on cherche à minimiser l'erreur de prédiction. Chez [Vas08] le but est de maîtriser l'erreur de prédiction, c'est-à-dire de connaître et contrôler la distribution de l'erreur en fonction de l'horizon de prédiction. L'objectif est de concentrer les courbes de distribution de l'erreur en fonction de l'horizon. L'erreur est la différence entre la future valeur estimée et la future valeur réelle mesurée, elle ne peut être calculée qu'après l'occurrence réelle de la faute.

Chez [CC10] l'exactitude est le ratio du nombre de prédictions exactes (on considère le centre de l'intervalle) sur le nombre total de prédictions.

### 3.4.1.2 Précision

**Définition 35** (diagnostic précis). *Un diagnostic précis est un diagnostic qui propose peu d'hypothèses.*

Nous quantifions la précision du résultat de diagnostic comme une fonction décroissante en fonction du nombre d'hypothèses. Nous choisissons la fonction inverse :  $\frac{1}{\|\Delta_k\|}$ . Ainsi la précision est à 1 si il n'y a qu'une hypothèse, ce qui est le cas idéal. Lorsque le module de diagnostic n'est pas précis et qu'il propose plus d'une hypothèse, le résultat de diagnostic est ambigu. Dans le cas où aucune hypothèse n'est proposée, il y a échec du diagnostic, la précision est nulle. La précision peut être définie de manière analogue pour le pronostic.

**Définition 36** (pronostic précis). *Un pronostic précis est un pronostic qui propose un intervalle étroit.*

Pour le pronostic, il y a deux sortes de précisions :

- La précision absolue représente l'étroitesse de l'intervalle. C'est la précision telle qu'elle est décrite dans la littérature. Elle est utile pour comparer les performances de différentes méthodes de pronostic dans les mêmes conditions, mais elle n'est pas utile pour caractériser le module de pronostic. Par exemple, un diagnostic imprécis en entrée entraînera un pronostic imprécis, sans que l'on puisse juger pour autant la qualité du pronostic.
- La précision relative est la précision ramenée à un horizon temporel. La prédiction doit être d'autant plus précise que l'horizon temporel est court.

Nous définissons la précision absolue comme  $\frac{1}{t_{max}^k - t_{min}^k}$ . Nous définissons la précision relative comme  $\frac{\hat{t}^k}{t_{max}^k - t_{min}^k}$  avec  $\hat{t}^k$  l'instant prédit de panne/défaillance choisi dans  $[\widehat{t}_{min}^k, \widehat{t}_{max}^k]$  et  $t_{min}^k \neq t_{max}^k$ . De même on peut définir la précision absolue et la précision relative de toute prédiction (par exemple portant sur les valeurs de paramètres).

Généralement la précision du pronostic augmente avec le temps, ce qui signifie que la taille de l'intervalle diminue ([CC10]).

Plus l'estimation est précise, plus elle est utile car la borne minimale et la borne maximale sont proches donc on peut estimer au plus proche l'instant cherché dans cet intervalle. Cependant il est plus probable qu'une estimation précise ne soit pas exacte puisque l'intervalle étant petit, la marge d'erreur est faible. Par exemple un résultat de type  $[t_c, +\infty[$  (où  $t_c$  est l'instant courant) n'est pas précis mais il est exact, bien qu'inutile.

Les erreurs sur les entrées du pronostic entraînent des erreurs sur la sortie du pronostic, mais n'influent pas forcément sur la précision. En effet l'amplitude de l'intervalle de sortie dépend des amplitudes des intervalles d'entrée (les valeurs de paramètres), mais pas du fait qu'ils soient exacts ou pas.

Les incertitudes sur les outils et sur les entrées joueront sur la précision, mais pas forcément sur l'exactitude. En effet, même avec de grands intervalles sur les entrées (leur taille permettant d'englober les incertitudes), la sortie sera certainement moins précise, mais elle le sera aussi bien pour la borne minimale que pour la borne maximale, donc le résultat a d'autant plus de chance d'être exact.

### 3.4.2 La qualité des modules de diagnostic et de pronostic

Nous avons vu que les définitions de précision et d'exactitude du pronostic découlent assez naturellement des définitions de précision et d'exactitude du diagnostic. Il n'en sera pas de même pour la confiance, car elle n'est pas définie pour le diagnostic. Un état de l'art autour des incertitudes et de la confiance a été présenté en section 1.4.4. Si on veut définir la confiance simplement, ce peut être la certitude d'avoir la bonne information sur l'état du système pour pouvoir réaliser la bonne action à savoir planifier ou non l'opération de maintenance adaptée à l'état du système. L'intérêt de définir la confiance est de permettre d'évaluer la certitude que l'on a de planifier les bonnes opérations de maintenance au bon moment en se basant sur le résultat de pronostic.

La prise de décision de planification d'action de maintenance est motivée par la connaissance :

- du risque financier, matériel, de réaliser l'action de maintenance pour rien, et le risque de ne pas le faire et qu'il y ait une défaillance ;
- de l'horizon : plus l'horizon est lointain, plus il reste de temps pour préciser la prédiction grâce à de nouvelles mesures. Plus l'horizon est proche, plus la décision doit être prise rapidement ;
- de la confiance que l'on a en la prédiction. Cette confiance découle de :
  - la constitution du module de pronostic. Plus les données d'entrée sur le vieillissement de l'équipement, et même sur la défaillance considérée, sont nombreuses et se recoupent, et plus il est facile d'avoir confiance en la loi de vieillissement et donc en la prédiction ;
  - la précision. On n'engagera pas d'action si le résultat n'est pas précis, car on n'a pas suffisamment d'information. C'est forcément pondéré par la criticité des défaillances qui sont prédites. Pour une défaillance très critique, même si la précision est mauvaise, on peut choisir de réaliser l'opération de maintenance à un instant proche de la borne minimale ;
  - l'exactitude, même si c'est un concept qui ne se mesure pas toujours. A défaut d'exactitude on peut évaluer les certitudes que l'on a : sur la borne minimale de l'intervalle prédit par exemple, si on peut justifier qu'on couvre bien le pire cas. Dans tous les cas, on est sûr qu'au moins une des deux bornes est bonne.

Pour aborder la confiance, qui est un mot que nous trouvons subjectif d'autant que l'état de l'art a montré que plusieurs notions pouvaient se cacher derrière, nous décidons de parler de qualité des modules de surveillance, de diagnostic, et de pronostic. Ces concepts sont présentés sur la figure 3.8. La qualité de chaque module est intrinsèque à ce module et ne dépend pas des entrées des modules. En revanche, la précision et l'exactitude du diagnostic et du pronostic dépendent en partie des entrées : de la qualité des mesures pour le diagnostic, de la qualité des mesures et de la précision et l'exactitude du diagnostic pour le pronostic.

Pour parler d'incertitude par rapport à une valeur de référence, le GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesures, [Nor96]) recommande de se référer plutôt à la "meilleure valeur disponible" qu'à la "valeur vraie" physique. Notons qu'ici "disponible" ne veut pas forcément dire observable, mais plutôt imaginable si l'on considère les meilleurs outils qui existent. Nous considérerons donc un diagnostic et un pronostic idéaux, qui seront les meilleurs résultats qu'il serait possible d'obtenir avec des modules de diagnostic et de pronostic idéaux.



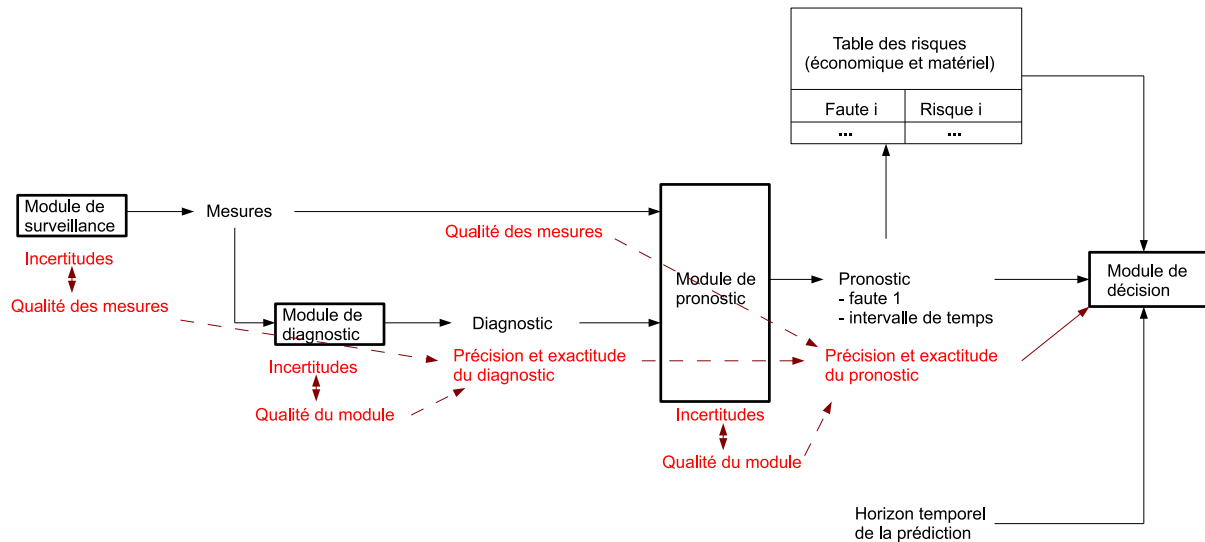


FIGURE 3.8 – Incertitudes dans le HMS.

### 3.4.2.1 Qualité du module de surveillance

Pour le module de surveillance, la qualité des mesures est liée à la représentation des rangs des paramètres observables sous forme d'intervalles de valeur.

### 3.4.2.2 Qualité du diagnostic

Nous supposons qu'il existe un diagnostic idéal  $\Delta_{idk}$ , calculé avec un module de diagnostic idéal. Nous établissons la qualité du module de diagnostic en comparant le résultat de diagnostic au résultat idéal pour une entrée donnée, c'est-à-dire un même ensemble d'observations. Nous choisissons de la définir comme le nombre d'hypothèses communes entre le cas idéal et le cas réel, divisé par le nombre d'hypothèses de l'ensemble le plus grand :

$$Q_{diag} = \frac{\text{card}(\Delta_{idk} \cap \widehat{\Delta}_k)}{\max(\text{card}(\Delta_{idk}), \text{card}(\widehat{\Delta}_k))} \quad (3.30)$$

Ainsi définie, si les hypothèses n'appartiennent pas à l'ensemble idéal, on remarque bien que la qualité du diagnostic est nulle. Si le résultat de diagnostic est le même que pour le diagnostic idéal, la qualité du diagnostic est maximale, égale à 1. Entre les deux, la qualité diminue avec l'augmentation du nombre d'hypothèses (le diagnostic est moins précis) ou avec la diminution de la taille de l'intersection (le diagnostic n'est plus exact).

La qualité est synthétique, ce qui peut être un avantage car il est toujours plus facile de traiter un paramètre unique, mais aussi un inconvénient. En effet la qualité du diagnostic peut avoir la même valeur pour un résultat exact mais imprécis et pour un résultat inexact mais précis. Si l'on souhaite analyser plus finement la qualité de diagnostic il convient donc de décorréler les deux caractéristiques de précision et exactitude et de les calculer comme dans la section 3.4.1.

### 3.4.2.3 Qualité du pronostic

Nous voulons que la qualité du module de pronostic représente la différence entre ce qui serait obtenu avec un module de pronostic idéal et ce qui est obtenu avec le module de pronostic utilisé, pour une même entrée, c'est-à-dire un même ensemble d'observations, et les mêmes hypothèses de diagnostic. Il existe un intervalle prédit idéal correspondant au module de pronostic idéal, soit  $[t_{idmin}^k, t_{idmax}^k]$  cet intervalle. La qualité du module de pronostic se fera donc en comparant l'intervalle prédit  $[\widehat{t}_{min}^k, \widehat{t}_{max}^k]$  à l'intervalle idéal.

Nous proposons d'établir la qualité du pronostic comme la taille de l'intersection entre l'intervalle prédit et l'intervalle idéal (pour l'exactitude), pondéré par la taille du plus grand des intervalles (pour la précision) :

$$Q_{prog} = \begin{cases} 0 & \text{si } [t_{idmin}^k, t_{idmax}^k] \cap [\widehat{t}_{min}^k, \widehat{t}_{max}^k] = \emptyset \\ \frac{1}{t_{max}^k - t_{min}^k} & \text{si } t_{idmin}^k = t_{idmax}^k \\ \frac{\min(t_{idmax}^k, \widehat{t}_{max}^k) - \max(t_{idmin}^k, \widehat{t}_{min}^k)}{\max(t_{idmax}^k - t_{idmin}^k, \widehat{t}_{max}^k - \widehat{t}_{min}^k)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.31)$$

Ainsi, qu'importe la taille de l'intervalle représentant le cas idéal, si le cas prédit est identique au cas idéal, on vérifie que la qualité est maximale,  $Q_{prog}=1$ . De plus, la qualité diminue si la taille de l'intervalle prédit augmente (c'est-à-dire si la précision diminue) ou si l'intersection entre les deux intervalles diminue (l'exactitude décroît). Si l'intersection est nulle, le résultat ne peut pas être exact, et la qualité est nulle,  $Q_{prog}=0$ .

Pour estimer la valeur de la qualité dans un cas pratique, il y a deux solutions. Soit on estime la qualité une fois que la vie de l'équipement est terminée, alors le cas idéal est la vraie vie, et est comparé au résultat de diagnostic et de pronostic. Soit on estime la qualité avant la fin de vie de l'équipement, et alors le cas idéal n'est pas connu mais il est possible de quantifier les incertitudes sur les différents outils utilisés.

La réponse idéale est relative à une entrée donnée. C'est la meilleure réponse si tout est certain : les modèles de comportement et de vieillissement, et les algorithmes. Pour comparer le cas idéal et le cas prédit, cela revient à un calcul d'incertitudes : il faut être capable d'estimer ce qui a été négligé lors de la construction de la méthode.

**Exemple.** Si la loi de vieillissement idéale est linéaire et monotone, de la forme  $y = kx$ , et l'entrée idéale est  $x = [1, 2]$ , alors la sortie idéale est  $y = [k, 2k]$ . On peut estimer les incertitudes :

- Si l'on estime avoir une incertitude de 10% sur le paramètre  $k$  de la loi, alors la sortie prédite devient  $y = [0.9k, 2.2k]$ . La qualité du pronostic est  $Q_{prog} = \frac{2k-k}{2.2k-0.9k} = 77\%$ .
- Si l'on estime avoir une incertitude de 20% sur la borne minimale de l'entrée  $x$ , alors la sortie prédite devient  $y = [0.8k, 2k]$ . La qualité est  $Q_{prog} = \frac{2k-k}{2.2k-0.8k} = 71\%$ .
- Si l'incertitude est sur la forme de la loi, et que par exemple la loi utilisée est  $y = ax^2 + b$ , alors la sortie prédite devient  $y = [a + b, 4a + b]$ . On ne peut estimer la qualité que si  $a$  et  $b$  sont connus par rapport à  $k$ , il faut avoir certaines informations pour conclure.

L'évaluation de la qualité du diagnostic et du pronostic comporte un aspect calcul d'incertitudes. [SG13] démontre que le calcul d'incertitudes peut être étudié comme un problème de propagation d'incertitudes. Pour ce faire, de nombreuses méthodes de calcul et de propagation d'incertitudes existent, elles sont répertoriées par exemple dans [dR06]. Le point dur est de quantifier les sources

d'incertitude, ce qui ne peut être fait que grâce à une bonne connaissance du comportement des équipements.

## Conclusion

Nous pensons que la confiance en les résultats de diagnostic et de pronostic peut s'appuyer sur ces notions de qualités que nous proposons. Comparer la qualité du diagnostic et du pronostic de plusieurs méthodes permet de connaître celles qui donnent les résultats les plus proches du cas idéal, et même de quantifier cette distance, et ainsi de choisir les méthodes avec la plus grande qualité. Ce sont les méthodes dans lesquelles on peut avoir la plus grande confiance, si nous définissons la confiance comme la certitude d'avoir les bonnes informations pour prendre les bonnes décisions d'action de maintenance.

### 3.4.3 La diagnosticabilité et la pronosticabilité

Un consensus existe autour de la définition de la diagnosticabilité. Nous l'explicitons ici formellement dans notre cadre générique. Par analogie avec cette définition, nous définissons ensuite la pronosticabilité.

#### 3.4.3.1 Diagnosticabilité

La diagnosticabilité d'un système a été à l'origine définie par [SSL<sup>+</sup>95] pour les systèmes à événements discrets. Pour résumer, la définition stipule que sur un nombre fini d'évènements, il n'existe pas deux trajectoires observables possibles, dont l'une contient la faute et l'autre non. Cette définition a été reprise dans [Puc08] pour les systèmes en temps continu, comme la capacité du système à produire des observations différentes pour chaque faute. Nous adaptons ces définitions pour proposer la définition suivante :

**Définition 37** (diagnosticabilité). *Un système est diagnosticable si et seulement si toutes les empreintes des fautes divergent en un temps fini. Les empreintes de faute sont les valeurs des observables depuis l'instant initial jusqu'à l'instant de diagnostic.*

Le module de diagnostic doit être capable de déterminer sans ambiguïté le mode dans lequel est le système à partir des observations. La diagnosticabilité repose sur la disponibilité et l'emplacement des capteurs.

Dans les faits un équipement est rarement parfaitement diagnosticable. On préfère parler des défaillances ou des fonctions diagnosticables à un instant  $t$ .

Avec les mêmes notations que précédemment, une défaillance  $k$  est diagnosticable à l'instant  $t$  si et seulement si  $\exists (\widehat{t_{min}^k}, \widehat{t_{max}^k}) \mid \widehat{t_{min}^k} < t^k < \widehat{t_{max}^k} < t$  où  $t - t^k$  est fini.

Pour les fonctions, une fonction est diagnosticable à un instant  $t$  si on peut connaître sa disponibilité à l'instant  $t$ . Cela repose sur le fait que la ou les défaillance(s) associée(s) soi(en)t diagnosticable(s).

Pour savoir si une fonction est disponible, il faut soit que son paramètre de sortie puisse être connu, soit que la disponibilité de la fonction puisse se déduire de l'arbre des fonctions. Ces deux

explications sont identiques, l'une au niveau des paramètres et l'autre au niveau fonctionnel. On choisira la mieux adaptée en fonction des connaissances disponibles.

L'ensemble des fonctions d'un composant  $\mathcal{C}^i$  diagnosticables par observations est  $\mathcal{FU}_d^i(t) \subset \mathcal{FU}$ . Il est défini comme :

$$Fu^{i,k} \in \mathcal{FU}_d^i(t) \Leftrightarrow (\forall p^{i,j} \in Supp(Fu^{i,k}), p^{i,j} \in \mathcal{P}_{obs}^i) \vee (op^{i,k} \in \mathcal{P}_{obs}^i) \quad (3.32)$$

L'ensemble des fonctions du système diagnosticables à l'instant  $t$  est  $\mathcal{FU}_d(t) \subset \mathcal{FU}$ . L'appartenance d'une fonction à cet ensemble est définie comme :

$$\begin{aligned} \mathcal{FU}_d(t) &= \bigcup_{i=1}^n \mathcal{FU}_d^i(t) \cup \{Fu^{i,k} \mid \exists \{Fu^{w,x}, \dots, Fu^{y,z}\} \subset (Pred(Fu^{i,k}) \cap \bigcup_{i=1}^n \mathcal{FU}_d^i(t))\}, \\ Av(Fu^{i,k}, t) &= f(Av(Fu^{w,x}, t), \dots, Av(Fu^{y,z}, t)) \end{aligned} \quad (3.33)$$

### 3.4.3.2 Pronosticabilité

Si la diagnosticabilité est un concept bien défini, la pronosticabilité ne fait pas encore consensus. Pour nous, la pronosticabilité d'un équipement est sa capacité à produire des évolutions de valeurs de paramètres différentes pour chaque faute. Le module de pronostic doit pouvoir déterminer sans ambiguïté le mode futur du système à partir des prédictions.

Pour définir la pronosticabilité, l'objet de l'étude ne doit pas être le module de pronostic mais bien le système à pronostiquer. Il faut également conserver à l'esprit que l'objectif du pronostic est bien d'identifier les futures fautes et les instants de défaillance associés, et pas seulement de déterminer le prochain instant de défaillance quelle qu'en soit l'origine. Nous proposons la définition suivante.

**Définition 38** (pronosticable). *Une défaillance est pronosticable s'il est possible de la prédire avant qu'elle ne se produise en se basant sur les observables et/ou les prédictions.*

Par analogie avec la définition de diagnosticabilité on peut dire qu'une défaillance est pronosticable si et seulement si il existe une date antérieure à la vraie date de défaillance à partir de laquelle la trajectoire des observables diverge par rapport à toutes les trajectoires des autres fautes. Les trajectoires sont les valeurs des observables depuis l'instant initial jusqu'à l'instant de pronostic. La défaillance  $k$  est pronosticable à l'instant  $t$  si et seulement si  $\exists \{\widehat{t_{min}^k}, \widehat{t_{max}^k}\} \mid t < \widehat{t_{min}^k} < t^k < \widehat{t_{max}^k}$  avec  $t - t^k$  fini.

Un système est pronosticable si toutes les défaillances sont pronosticables : toutes les trajectoires divergent avant la première défaillance.

Pour le diagnostic et le pronostic il s'agit en fait de trouver un encadrement  $[\widehat{t_{min}^k}, \widehat{t_{max}^k}]$  de l'instant  $t^k$  d'une défaillance  $k$ . Suivant que l'encadrement appartient au passé ou au futur, on parlera de diagnosticabilité ou de pronosticabilité.

La pronosticabilité repose sur la disponibilité des lois de vieillissement permettant de calculer l'évolution des paramètres privés dans le temps, et les lois de rétroaction donnant les valeurs des

facteurs d'endommagement en fonction de l'endommagement du système, et sur la connaissance de l'évolution future de la configuration (environnement).

Dans les faits un équipement ne sera pas forcément pronosticable dans son ensemble. On préfère parler de fonctions pronosticables à l'instant  $t$ . Une fonction est pronosticable à un instant  $t$  si on peut connaître sa disponibilité aux instants futurs.

Cela repose sur le fait que soit le paramètre de sortie est prédictible, soit la pronosticabilité de la fonction peut se déduire de l'arbre des fonctions.

L'ensemble des fonctions d'un composant  $\mathcal{C}^i$  pronosticables est  $\mathcal{FU}_p^i(t) \subset \mathcal{FU}$ . Il est défini comme :

$$Fu^{i,k} \in \mathcal{FU}_p^i(t) \Leftrightarrow (op^{i,k} \in \mathcal{P}_{pred}^i) \quad (3.34)$$

L'ensemble des fonctions du système pronosticables à l'instant  $t$  est  $\mathcal{FU}_p(t) \in \mathcal{FU}$ . L'appartenance d'une fonction à cet ensemble est définie comme :

$$\mathcal{FU}_p(t) = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{FU}_p^i(t) \cup \{Fu^{i,k} \mid \exists \{Fu^{w,x}, \dots, Fu^{y,z}\} \subset (Pred(Fu^{i,k}) \cap \bigcup_{i=1}^n \mathcal{FU}_p^i(t))\}, \quad (3.35)$$

$$Av(Fu^{i,k}, t) = f(Av(Fu^{w,x}, t), \dots, Av(Fu^{y,z}, t))$$

De la même manière que le nombre de capteurs disponibles conditionne le nombre de paramètres observables et donc le diagnostic, le nombre de lois de vieillissement et de lois de rétroaction sur les facteurs d'endommagement conditionne le nombre de paramètres prédictibles et donc le pronostic.

### 3.4.3.3 Retour sur la conception

Après étude de diagnosticabilité, le retour vers la conception prend la forme de suggestion d'ajout de capteurs, et de résidus adaptés, par exemple des résidus directionnels. Les manifestations des fautes doivent être différentiables, et pour ce faire on oriente à la fois le système, via les capteurs, et le traitement de l'information, via les résidus. Pour le pronostic, nous pensons que c'est au niveau de la manière dont vieillit le système que les choses peuvent être différentiables.

Nous imaginons qu'il est possible de déterminer sans connaissance très fine des processus plusieurs modèles de vieillissement pour un équipement complexe. Au moment de la conception, nous pensons qu'il faudrait prendre en compte le fait que ces modèles puissent être différentiables. Si les lois de vieillissement sont bien différentes, le Health Monitoring revient à "diagnostiquer" quelle loi de vieillissement est suivie, puis à simplement prédire l'évolution future en se basant sur cette loi de vieillissement.

Lors de la conception, on peut aussi orienter les évolutions en vieillissement, par exemple grâce à des pièces d'usure bon marché qui recevront le plus gros de la contrainte mais que l'on saura changer dès que besoin, ou en faisant en sorte de n'avoir que des modes de vieillissement différents.

On peut encore une fois faire le parallèle avec le diagnostic. Les manières de vieillir doivent être différentiables, et pour ce faire on oriente à la fois le système, via des pièces d'usure par exemple, et le traitement de l'information, via les lois de vieillissement et les résidus prédictibles.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous basons sur le cadre de modélisation développé dans le chapitre 2 pour construire une méthode formelle de Health-Monitoring. Différents modes sont proposés pour représenter les comportements nominaux, dégradés, en faute, ou anormaux des composants du système, leur fusion permet de déduire le mode du système dans sa globalité. Une représentation sous forme d'automate des modes permet de représenter les évolutions possibles des comportements des composants, une synchronisation de ces automates permet de représenter le comportement du système.

La seconde partie du chapitre vise à décrire la méthode de détermination de l'état de santé du système en se basant sur le modèle présenté précédemment. La méthode se base sur la construction de résidus à partir des observations et des prédictions. Ces résidus sont la base des algorithmes de diagnostic et de pronostic proposés. L'algorithme de pronostic réutilise l'algorithme de diagnostic. Des métriques de performance du diagnostic et du pronostic sont proposées après une analyse de l'état de l'art à ce sujet. Une proposition est faite pour gérer les incertitudes liées au Health-Monitoring, nous créons la notion de qualité du Health-Monitoring, qui peut permettre de justifier la confiance dans le résultat de diagnostic et pronostic, et de comparer différentes méthodes pour choisir la mieux adaptée. La diagnosticabilité et la pronosticabilité des systèmes sont également définies et expliquées dans notre cadre formel.

Les chapitres suivants illustrent cette partie théorique en l'appliquant au module moto-pompe d'un actionneur électro-hydraulique utilisé chez Messier-Bugatti-Dowty.



**Résumé :** l'équipement sur lequel nous souhaitons appliquer la méthode de Health-Monitoring développée dans le chapitre 3 est le module moto-pompe d'un EHA. La constitution et le fonctionnement de la machine électrique et de la pompe hydraulique sont décrits en détails, et intégrés à une explication plus globale de l'EHA et de ses autres composants. Les défaillances de l'ensemble moto-pompe sont analysées pour choisir les défaillances les plus critiques sur lesquelles appliquer notre méthode. Ensuite les comportements nominaux du moteur et de la pompe sont modélisés, et le modèle est mis en forme pour correspondre au cadre générique de modélisation que nous avons développé dans le chapitre 2.

## Introduction

Le système choisi pour illustrer la méthode de Health Monitoring que nous avons développée dans les chapitres précédents est un ensemble moto-pompe intégré à un module électrohydrostatique (EHM), lui-même intégré à un actionneur électrohydrostatique (EHA) comme représenté sur la figure 4.1.

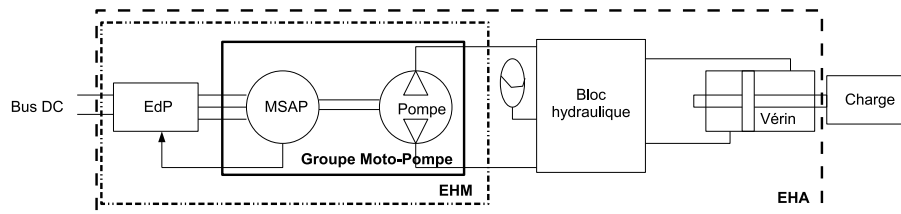


FIGURE 4.1 – Représentation schématique de l'EHA

L'objectif de l'EHA est de positionner une charge connectée à un vérin piloté grâce à la puissance hydraulique fournie par la pompe. Pour nos applications particulières, la charge peut être soit une jambe de train d'atterrissage, soit une commande de vol.

Actuellement les EHA sont utilisés seulement en mode secours pour les commandes de vol, car la maturité de la technologie n'est pas encore suffisante, comme expliqué en 1.2. Le Health Monitoring se présente comme une solution intéressante pour maîtriser les durées de vie de l'EHA et les exigences de fiabilité associées à l'objectif d'utiliser les EHA en mode normal (ou "front line").

L'EHA et principalement la pompe et le moteur sont présentés dans ce chapitre, de manière à expliquer leur comportement et à recenser les défaillances qui peuvent leur survenir. L'ensemble moto-pompe est modélisé suivant le cadre de modélisation proposé dans le chapitre précédent.



## 4.1 Description de l'équipement et de ses modes de défaillance

L'EHA est constitué de plusieurs composants, comme le montre la figure 4.1, dont essentiellement :

- une électronique de puissance (EdP) contrôlée et alimentée par l'environnement,
- un moteur électrique, de type Machine Synchrone à Aimants permanents (MSAP),
- une pompe hydraulique,
- un vérin.

L'EdP, le moteur et la pompe forment l'EHM. Dans chaque composant, il y a des transformations de puissance comme le montre la figure 4.2. Ces transformations sont bidirectionnelles : chaque composant a deux variables de puissance en entrée, et deux variables de puissance en sortie. Il faut donc établir une convention pour le sens de ces échanges. Nous choisissons la causalité des transformations en vitesse, car cela représente mieux à notre sens le comportement utile de l'actionneur dont la fonction est de positionner une charge. De plus la position de la charge est une intégration du débit de la pompe (de manière idéale), ce qui est mieux qu'une opération de dérivation. Les transformations d'effort peuvent alors être vues comme des perturbations dont les transformations de vitesse doivent s'accomoder.

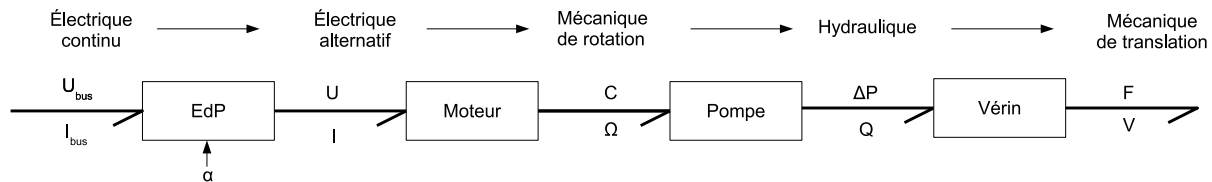


FIGURE 4.2 – Transformation d'énergie dans les composants de l'EHA

Pour détailler ces transformations, l'électronique de puissance transforme de l'énergie électrique continue en énergie électrique triphasée, qui est transformée par la machine électrique en énergie mécanique. La pompe transforme cette énergie mécanique en énergie hydraulique. Enfin, c'est le vérin qui transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique transmise à la charge.

Le Health Monitoring ne sera mis en place que sur le moteur et la pompe. Cependant l'électronique et le vérin sont également présentés et brièvement modélisés car ils permettent d'avoir des informations sur l'ensemble moto-pompe.

### 4.1.1 Description de la machine électrique

#### 4.1.1.1 Présentation générique

Les machines électriques sont utilisées en mode moteur pour convertir l'énergie électrique qui leur est fournie en énergie mécanique vers une charge, ou inversement en mode générateur pour convertir une énergie mécanique reçue en énergie électrique vers le réseau ou vers une résistance de charge. La machine considérée est une machine synchrone triphasée à aimants permanents, qui fonctionne dans les 4 quadrants du graphe Couple/Vitesse de rotation.

Par exemple, lorsque le moteur appartient à un actionneur de train d'atterrissage, la charge est toujours dans le sens de la gravité donc le couple est toujours du même signe, alors que la vitesse

est négative ou positive suivant que l'atterrisseur descend ou remonte. Dans ce cas la MSAP fonctionne dans deux quadrants :  $C > 0; \Omega > 0$  et  $C > 0; \Omega < 0$ . Lorsque le moteur appartient à un actionneur de commandes de vol, la charge dépend du braquage et du vent relatif, donc le couple peut être positif ou négatif, et de même pour la vitesse. Dans ce cas la MSAP fonctionne dans les 4 quadrants.

La MSAP est composée d'une partie fixe, comportant le stator et le corps, et d'une partie mobile, comportant le rotor et l'arbre moteur (voir la figure 4.3). Le stator est protégé par une frette statorique et le rotor est protégé par une frette rotorique. L'arbre, solidaire du rotor, est guidé par des roulements à billes par rapport au corps. Le moteur est protégé par sa carcasse.

Le stator comporte un bobinage avec plusieurs enroulements répartis en trois phases que l'on appellera a, b et c, connectées entre elles en étoile au niveau du neutre. Le stator, alimenté en triphasé, produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation des phases.

Le rotor comporte des aimants permanents qui produisent un champ magnétique. Ce champ rotorique et le champ statorique se synchronisent. Cela entraîne le rotor et donc l'arbre en rotation par rapport au stator. La vitesse de rotation mécanique est toujours proportionnelle à la fréquence électrique des signaux électriques.

Si l'on se place dans un quadrant moteur, l'effort dont la MSAP doit s'affranchir est le couple exercé sur l'arbre moteur par l'environnement, donc ici essentiellement par la pompe et par l'inertie. C'est un couple de perturbation. Pour ce faire les forces électromotrices induites par le champ rotorique dans les enroulements entraînent l'application d'un couple par le rotor sur l'arbre, de signe opposé au couple extérieur. C'est la différence de ces deux couples qui permet la mise en mouvement et l'accélération du rotor. Dans un quadrant générateur, le fonctionnement est inverse, et le courant est renvoyé vers le bus DC à travers l'EdP.

Nous considérons que les pertes dans le moteur sont liées aux frottements de nature visqueuse entre le rotor et le stator, à l'inertie du rotor, et aux pertes par courants de Foucault. Les ordres de grandeur nominaux pour les machines utilisées sont, au maximum, de  $\Omega = 10000tr/min$ , pour une charge de  $C = 10Nm$ , soit une puissance de  $10kW$ .

#### 4.1.1.2 Présentation détaillée des MSAP considérées et de leurs défaillances

Deux machines spécifiques sont étudiées. Ce sont des machines triphasées à flux radial, avec les trois phases qui ne se recouvrent pas, et avec des aimants permanents montés en surface sur le rotor.

**La MSAP 10-12** Le nom de cette machine vient de ses 10 pôles et 12 encoches, elle est représentée sur la figure 4.3. Le rotor a 5 paires de pôles soit 10 aimants et chaque phase est divisée en deux bobines élémentaires connectées en série. Il y a donc 6 bobines élémentaires placées dans la séquence suivante : [C+ B- A+ C- B+ A-] où + et - représentent le sens de bobinage. Le stator a deux sections qui se répètent avec une périodicité négative. Chaque bobine élémentaire a la moitié du nombre total de spires dans la phase, avec une résistance de  $R/2$  et une inductance de  $L/4$ . L'harmonique fondamental du champ magnétique statorique est l'harmonique numéro 5. Les encoches sont disposées tous les  $2\pi/6$  radians. Seulement une dent sur deux est bobinée, et chaque encoche contient seulement une phase, ce qui est intéressant pour les propriétés de

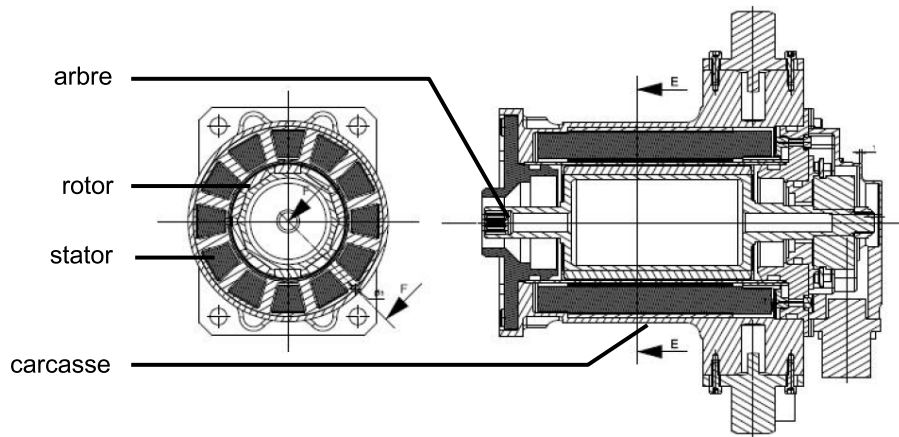


FIGURE 4.3 – MSAP 10-pôles 12-encoches

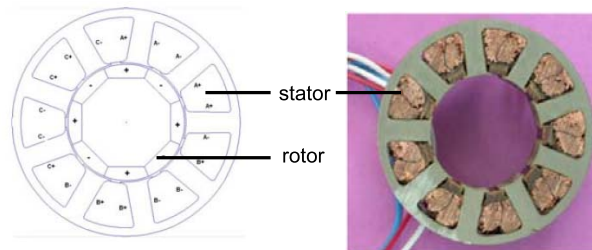


FIGURE 4.4 – La MSAP 8-9

tolérance aux fautes. Les contacts entre phases sont limités ce qui permet de diminuer les risques de court-circuit entre phases.

**La MSAP 8-9** Cette machine a 8 pôles et 9 encoches. Le rotor a 4 paires de pôles et le stator est composé de 9 bobines élémentaires, chaque phase étant divisée en trois bobines élémentaires connectées en série. Chaque bobine élémentaire a une résistance de  $R/3$  et une inductance de  $L/9$ . La séquence de l'enroulement est [A+ A- A+ B+ B- B+ C+ C- C+] comme le montre la figure 4.4. L'harmonique fondamental du champ magnétique statorique est l'harmonique numéro 4. Contrairement à la machine 10-12, toutes les dents sont bobinées et cette machine a deux phases par encoche (ce qui augmente potentiellement le risque de court-circuit entre phases).

#### 4.1.2 Description de la pompe hydraulique

Les pompes volumétriques, dont une photographie est montrée sur la figure 4.5, sont utilisées pour convertir de l'énergie mécanique en énergie hydraulique. La rotation de l'arbre de la pompe entraîne le transport d'un volume de fluide entre ses deux ports, et délivre donc un débit fonctionnel d'entrée/sortie proportionnel à la vitesse de rotation.

La pompe considérée est une pompe à faible débit et à haute pression. L'ordre de grandeur est  $10 L/min$  pour le débit et  $350 bar$  de pression différentielle entre les deux ports. C'est une pompe à cylindrée fixe, à pistons axiaux, à axe brisé. Elle fonctionne dans les quatre quadrants de puissance. Cela implique que chacun des deux ports peut être soit un port d'entrée soit un

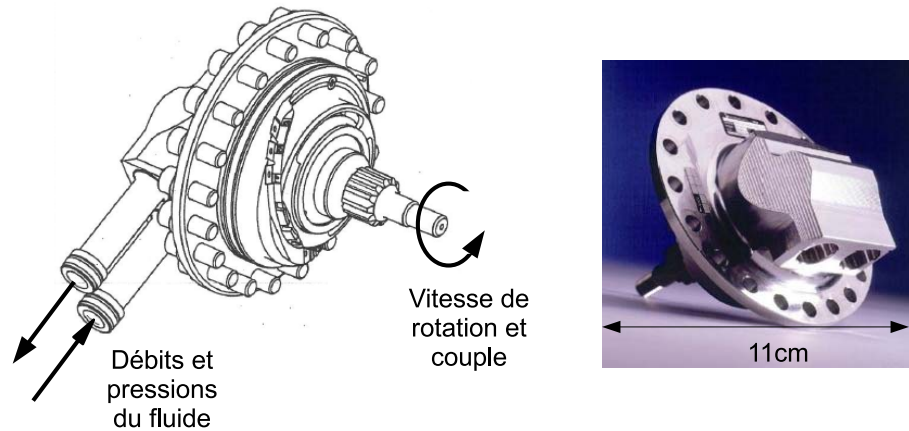


FIGURE 4.5 – Dessin en perspective et photographie de la pompe hydraulique

port de sortie du fluide, et soit un port basse pression soit un port haute pression.

La pompe est présentée sur la figure 4.6. Elle se compose d'un corps de pompe à l'intérieur duquel s'actionne un mobile réalisant la fonction de pompage. Le mobile est constitué de l'arbre, d'un engrenage, d'un barillet percé de puits (dits puits de barillet) dans lesquels logent les pistons. Les pistons sont reliés au plateau de l'arbre d'entraînement via les biellettes. Enfin, la distribution s'opère à travers une glace, qui est bloquée en rotation. Le ressort plaque le barillet sur la glace. La glace est percée de deux lunules, qui font face aux puits de barillet d'un côté et aux ports de pompe de l'autre (voir la figure 4.7).

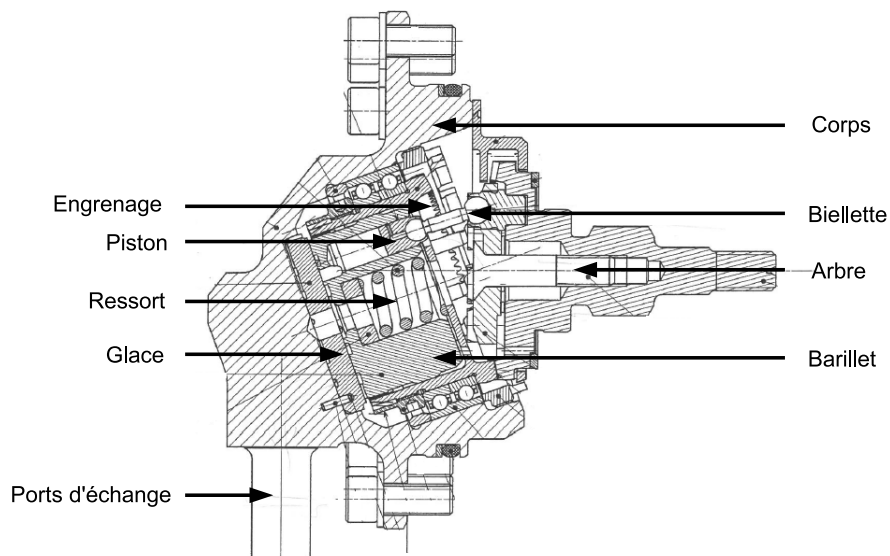


FIGURE 4.6 – Coupe de la pompe et de ses différents composants

Les résistances hydrauliques entre les ports et les puits de barillet sont modulées par la position angulaire relative du barillet par rapport à la glace. La glace étant fixe, une lunule est toujours située en face du même port. Le barillet étant en rotation, les puits de barillet sont alternativement en face d'une lunule, ou occultés, lors de la rotation.

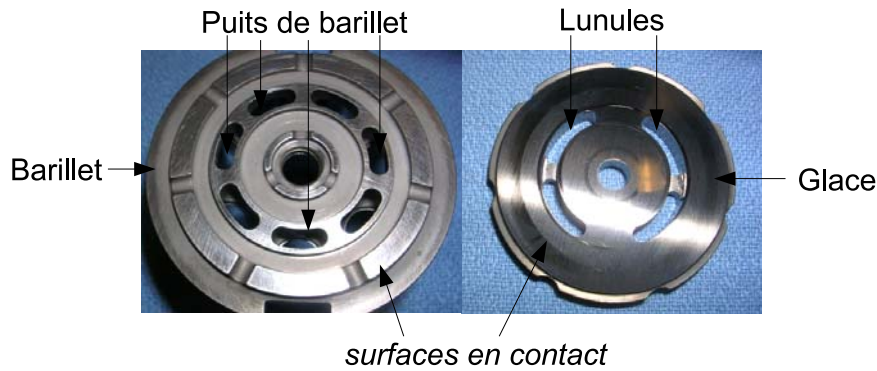


FIGURE 4.7 – Photographie de la partie distribution de la pompe. À gauche, face du barillet qui sera en contact avec la glace à travers un film hydraulique. On distingue les 7 puits de barillet, par lesquels circule le fluide depuis/vers les chambres. Les reliefs permettent une bonne lubrification entre la glace et le barillet tout en limitant les fuites internes. À droite, glace de distribution. On peut voir les deux lunules.

Les axes des pistons sont parallèles à l'axe de rotation du barillet, qui est incliné d'un angle  $\alpha$  constant avec l'axe de l'arbre d'entraînement. Les bielles sont en liaison rotule avec le plateau de l'arbre d'entraînement. L'angle  $\alpha$  est à l'origine des mouvements linéaires alternatifs des pistons par combinaison de mouvement (voir sur la figure 4.8).

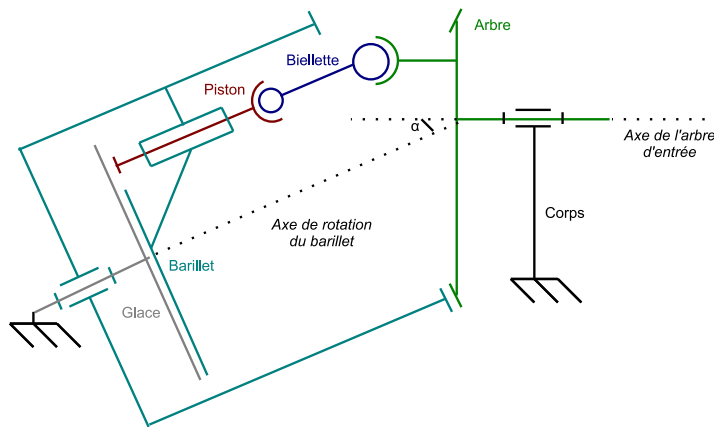


FIGURE 4.8 – Schéma cinématique de la pompe

Le principe de la pompe à pistons est d'utiliser les variations de volume occasionnées par le déplacement des pistons dans les puits de barillet. Le fonctionnement est le suivant : l'arbre de la pompe est en mouvement de rotation, et l'engrenage synchronise la rotation du barillet et des bielles. Du fait de l'axe brisé, les pistons se trouvent tour à tour en position haute puis en position basse dans leurs puits de barillet, à une fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation. Il y a une composition de mouvement : une translation rotatoire par l'engrenage et une translation axiale grâce aux bielles.

La conversion d'énergie mécanique en énergie hydraulique se fait donc de la manière suivante. Les déplacements linéaires des pistons dans les puits de barillet alternativement dans un sens puis dans l'autre entraînent des phases d'aspiration et de refoulement du fluide en modifiant les volumes libres pour le fluide (voir sur la figure 4.9) :

- l'aspiration est l'action mécanique des pistons qui augmentent le volume de la chambre en passant en position haute dans les puits, ce qui diminue la pression de la chambre par rapport à la pression de la lunule. Cela crée un débit de fluide depuis la lunule vers la chambre du piston ;
- le refoulement est l'action mécanique des pistons qui diminuent le volume de la chambre du piston en redescendant dans les puits, ce qui entraîne une augmentation de la pression du fluide dans la chambre, créant un débit de fluide vers l'extérieur de la pompe à travers la lunule et le port auquel est connectée la lunule.

Les lunules sont placées de telle sorte que les pistons en face de la même lunule sont dans la même phase : soit tous en aspiration, soit tous en refoulement. Les chambres des pistons qui sont au point mort haut ou au point mort bas sont occultées par la glace.

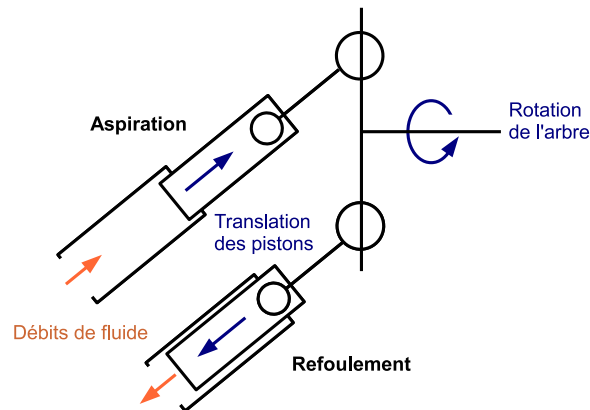


FIGURE 4.9 – Représentation des phases d'aspiration et de refoulement.

Le corps de pompe est noyé dans le fluide. L'étanchéité dynamique aux niveaux des liaisons mécaniques aurait pu être réalisée grâce à des joints dynamiques, mais cela aurait été trop peu fiable et peu adapté aux fortes dynamiques de mouvement, l'usure aurait été très rapide. La méthode choisie est la création de jeux calibrés entre les composants d'une liaison. Un film de fluide est créé par exemple entre la glace et le barillet ou entre le piston et le puits de barillet, ce qui permet également la lubrification entre les composants. La hauteur des films de fluide détermine le niveau de frottement, et le niveau de fuites vers le drain. S'ils sont trop épais, le niveau de fuite augmente, mais s'ils disparaissent, l'usure entre les composants risque d'être très rapide.

Les principales pertes énergétiques dans la pompe sont :

- les pertes par frottement hydraulique dans les jeux entre pièces mobiles
- les fuites internes, au niveau des jeux entre les composants (piston dans puits de barillet, ou interface glace/barillet). Le fluide s'échappe vers le corps de pompe au lieu de participer aux échanges utiles.
- les pertes mécaniques entre solides (roulements à billes, engrenage)

La caractéristique principale des pompes est la cylindrée  $V_0$  qui est le volume théorique de fluide transféré d'un port vers l'autre pour un tour de pompe. La connaissance de la cylindrée permet de déduire, en quadrant moteur (en générateur, c'est l'inverse), les débits refoulés. Le débit refoulé théorique est le produit de la cylindrée par la vitesse de rotation. Le débit refoulé réel est le volume de fluide refoulé par unité de temps dans des conditions de vitesse et de pression données. Le rendement volumétrique  $\eta_v$  est alors le rapport entre le débit refoulé théorique et le

débit refoulé réel à une pression considérée :

$$\eta_v = \frac{\Omega_m V_0}{Q_{ref}} \quad (4.1)$$

On peut également calculer les couples de l'arbre de la pompe. Le couple théorique est le produit de la cylindrée par le différentiel de pression. Le rendement mécanique  $\eta_m$  est alors le rapport entre le couple théorique et le couple réel de l'arbre de la pompe.

$$\eta_m = \frac{\Delta P V_0}{C_a} \quad (4.2)$$

### 4.1.3 Description des composants environnant l'ensemble moto-pompe

#### 4.1.3.1 Description de l'électronique de puissance

L'électronique de puissance considérée, de type convertisseur continu alternatif, transforme de la puissance électrique continue en puissance électrique triphasée.

Pour simplifier la représentation des boucles de commande, nous considérons que les boucles de contrôle du moteur (en vitesse et en courant) sont dans l'EdP. On ne fait apparaître qu'un seul signal de commande. Les capteurs ne sont pas représentés. Comme nous considérons un pilotage en vitesse, le signal de commande dépend de la position de la charge par rapport à sa position désirée et permet de contrôler la vitesse de rotation du moteur électrique.

La partie conversion électrique est composée d'un hacheur et d'un onduleur, eux-mêmes constitués d'interrupteurs électroniques. Ils convertissent la tension continue en tension alternative d'amplitude et de fréquence désirée, grâce au rapport cyclique imposé par la commande.

#### 4.1.3.2 Description du vérin

Le vérin considéré est un vérin hydraulique double effet composé d'un corps et d'un piston. Il transforme une énergie hydraulique en énergie mécanique. Le débit de fluide en entrée/sortie des deux chambres du vérin est transformé en vitesse de déplacement linéaire du piston. L'effort parasite est la force exercée par la charge sur le piston, qui est transformée en pression différentielle du fluide dans les chambres et notamment au niveau des ports d'entrée/sortie. Les pertes énergétiques sont principalement dues aux frottements des joints et des paliers de guidage du piston.

### 4.1.4 Analyse des défaillances de l'ensemble moto-pompe

L'ensemble des modes de défaillance et des fautes possibles pour l'ensemble moto-pompe est étudié grâce aux retours d'expériences de machines et de pompes similaires. L'objectif est d'identifier et de décrire tous les événements redoutés, pour choisir les défaillances qui sont les plus pertinentes à surveiller.

Un tableau de type AMDE/AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets / et Criticités) est construit avec pour chaque défaillance potentielle :

- la ou les causes de la défaillance. Quel est le composant qui ne réalise plus correctement une ou des fonctions qui lui sont attribuées, et quelle est la dégradation ou la faute de ce composant. Comme il est possible d'avoir plusieurs causes pour une même défaillance toutes les causes possibles et indépendantes doivent être identifiées et décrites. Il est à noter que la défaillance d'un composant peut aussi être la cause de la défaillance d'un autre composant du système ;
- la ou les conséquences à l'échelle du composant et à l'échelle du système.

Une fois les modes de défaillance recensés, une hiérarchie peut être établie entre eux grâce au concept de criticité, qui prend en compte d'une part la fréquence de la défaillance et d'autre part sa gravité, c'est-à-dire l'importance de ses conséquences sur le système.

A chaque défaillance est attribué un indice de fréquence selon une échelle de cotation définie pour le projet. La fréquence  $f$  de la panne est évaluée grâce aux retours d'expérience sur les systèmes en fonctionnement depuis une durée suffisamment importante, et grâce à une analyse de fiabilité des composants basée sur des essais et sur les bases de données des fournisseurs.

La gravité  $g$  de la panne est évaluée en fonction de trois critères : les dommages causés au système, les conséquences de la défaillance sur la durée de vie du système, et le coût de la maintenance nécessaire à la résolution du problème. A chaque défaillance est attribué un indice de gravité selon une échelle de cotation définie pour le projet. Dans le cas de notre étude, une échelle de 1 à 5 est établie suivant des critères qualitatifs :

- pas de conséquence sur le fonctionnement : gravité 1 ;
- légère dégradation de performance : gravité 2 ;
- dégradation importante de performance : gravité 3 ;
- perte de fonction : gravité 4 ;
- destruction du composant et dangerosité pour les autres composants : gravité 5.

Le produit de la fréquence par la gravité donne un indice appelé indice de criticité  $c$  allant de 1 (peu critique, rare avec un impact limité sur le composant et ses performances) à 25 ici (extrêmement critique, conduisant à la perte de l'équipement avec une occurrence importante).

Les défaillances à étudier sont choisies en fonction de trois critères : leur criticité, le fait qu'elles soient progressives et non pas franches, et la faisabilité des modèles de faute et de vieillissement (établie d'après les experts et la littérature).

### 4.1.4.1 Analyse des modes de défaillance des MSAP

Une AMDEC réalisée sur les moteurs électriques permet de construire le tableau 4.1 qui présente les fautes des MSAP hiérarchisées dans l'ordre de leur criticité.

La défaillance la plus critique de notre tableau concerne les roulements à billes. Cependant ces défaillances sont étudiées en détail dans le groupe Safran, notamment chez Snecma ([Gri], [BG]) où des méthodes de diagnostic et de pronostic ont été proposées. La stratégie de Messier-Bugatti-Dowty sur ce point est plutôt de porter l'effort sur les autres défaillances les plus critiques.

Les deux défaillances choisies sont les courts-circuits statoriques et la désaimantation partielle du rotor.

Nous réalisons un état de l'art sur la surveillance du court-circuit entre spires et la désaimantation partielle du rotor.



Défaillance	f	g	c
Désalignement de l'arbre	1	2	2
Rupture de la frette rotorique ou statorique	1	2	2
Perte d'étanchéité du carter	1	5	5
Rupture ou fissure de l'arbre	3	2	6
Désaimantation partielle du rotor	2	3	6
Courts-circuits statoriques	4	5	20
Rupture des roulements à billes	5	5	25

TABLE 4.1 – Evaluation de la progressivité des fautes des MSAP, ainsi que de leur criticité  $c$  calculée à partir de leur fréquence  $f$  et de leur gravité  $g$ .

**Les courts-circuits entre spires** Plusieurs méthodes de détection et de diagnostic du court-circuit sont trouvées dans la littérature.

Dans [Kho09] des méthodes d'identification récursives sont mises en place pour les paramètres électriques tels que les résistances et inductances. Les résidus de faute sont générés grâce à ces méthodes puis analysés. Trois méthodes sont présentées et celle des moindres carrés récursifs est choisie. L'algorithme est utilisé avec un modèle réduit basé sur les courants de Park.

[BNMMT07] utilise un indicateur basé sur l'apparition du second harmonique dans la puissance mécanique, ce qui nécessite la connaissance des tensions induites et donc l'addition de nouveaux capteurs très lourds et encombrants. De la même manière, la méthode proposée dans [PSF94] nécessiterait de nouveaux capteurs, de fuite de flux axial cette fois.

Des auteurs comme [CCF99] font de la détection et de l'isolation de faute en se basant sur les résultats expérimentaux uniquement. Cela peut devenir très coûteux car de nombreux essais sont nécessaires. De plus les résultats obtenus avec cette approche ne sont pas généralisables sans une étude théorique approfondie. Avec la méthode à base de modèle que nous avons choisie, l'un des gros avantages est qu'une fois que la méthode a été mise en place pour une typologie de moteur générique, le modèle nécessite seulement de légères modifications pour s'adapter aux autres types de machine.

Plusieurs modèles de court-circuit entre spires, plus ou moins précis, se trouvent dans la littérature. Des modèles développés à partir de calculs tridimensionnels comme dans [Ain12] sont très longs à simuler. [Vas11] crée notamment deux modèles différents. L'un est construit avec une méthode à éléments finis, il est très précis et permet de représenter des phénomènes locaux, le matériel et la configuration exacte de la machine, sans utiliser beaucoup d'hypothèses simplificatrices. Cependant il est très long à implémenter et très lent à simuler. Ce genre de modèle peut être adapté pour servir de prototype virtuel ou pour valider un modèle simplifié, mais il ne convient pas à notre objectif de construction analytique de résidu de faute. Nous souhaitons plutôt développer un modèle analytique et rapide à simuler.

Pour ce qui est du pronostic des courts-circuits, nous trouvons peu d'études réalisées. Citons tout de même [GCKV05] qui prédit la durée de vie du moteur à courant continu d'un EMA. Il suppose qu'une loi de vieillissement linéaire donnant la durée de vie en fonction de la température existe. L'usure de l'isolant est la somme des usures aux différentes températures d'utilisation, dont la valeur, exprimée en pourcentage, dépend de la durée de la plage temporelle et de la température. Grâce à la connaissance des températures d'utilisation passées et futures, l'auteur prédit l'instant

de court-circuit comme l'instant où il y a 100% d'usure. La méthode est montrée uniquement en simulation, car comme souvent lorsque l'on aborde la problématique du pronostic, les données réelles de vieillissement manquent. [LFMM11] propose une loi de vieillissement basée sur des essais, que nous explicitons plus loin en vue de l'adapter à notre application.

**La désaimantation partielle du rotor** Avec une méthode aux éléments finis, [KKKL09] comparent trois sortes de rotor : avec une couche d'aimants, avec deux couches d'aimants, ou avec des aimants en V. Ils concluent que les rotors à une seule couche d'aimants présentent le plus de risque de désaimantation, ce qui conforte l'importance attribuée par les experts à ce type de faute pour nos MSAP qui ont justement cette configuration.

Nous trouvons plusieurs modèles de désaimantation dans la littérature. [Far08] propose deux sortes de modèles. Le premier est basé sur la résolution analytique des équations de Laplace en coordonnées de Laplace. C'est un modèle rapide à simuler mais qui utilise beaucoup d'hypothèses simplificatrices. Le second modèle est une représentation avec un réseau de perméances et de reluctances, il est plus précis mais très long à implémenter et simuler.

[RBA10] étudie les effets de la démagnétisation grâce à des modèles à éléments finis. La stratégie de détection de faute est basée sur une analyse spectrale des courants de phase. Deux configurations d'enroulement sont considérées : en série ou en parallèle. Dans le cas où les bobines élémentaires sont connectées en série comme pour nos machines, les simulations sont faites pour une machine saine et pour une machine avec désaimantation locale de 16.7%. Avec la désaimantation, la forme d'onde semble inchangée mais les amplitudes du spectre varient légèrement. Il aurait été intéressant de pousser plus avant la désaimantation pour mieux observer ses effets, ce que nous comptons faire.

[CFRS09], grâce à un modèle FEMM, montre que de nouvelles fréquences apparaissent dans le spectre des tensions induites. Ils disent que l'effet de la désaimantation dépend de la typologie des MSAP, mais n'expliquent pas de quelle manière. Les conclusions sont uniquement empiriques puisqu'il n'y a pas d'étude analytique.

### 4.1.4.2 Analyse des modes de défaillance de la pompe hydraulique

De la même manière une AMDEC réalisée sur les pompes hydrauliques permet de construire le tableau 4.2 qui présente les fautes des pompes hydrauliques hiérarchisées dans l'ordre de leur criticité.

La faute sur les roulements n'est pas étudiée pour la même raison que précédemment. Les fautes sélectionnées sont :

- usure des alésages du barillet conduisant au grippage des pistons dans les alésages ;
- rayures et érosion des faces de distribution côté glace/barillet ;
- dessertissage des rotules de la bielle côté plateau ou côté piston.

La prochaine section concerne la modélisation de l'équipement.

Défaillance	$f$	$g$	$c$
Usure des cannelures de l'arbre moteur ou écaillage des dents de l'engrenage	1	1	1
Torsion des bielles	2	2	4
Perte de rigidité, rupture du ressort	2	2	4
Fissure du carter	1	4	4
Desserrage de l'écrou de précharge ou de maintien de roulement	2	2	4
Détérioration, rupture, ou desserrage des adaptateurs Rosan	1	4	4
Perte d'étanchéité des joints statiques	2	4	8
Usure des alésages du barillet conduisant au grippage d'un piston	2	5	10
Rayures et érosion des faces de distribution de la glce	5	2	10
Ecaillage pouvant mener au grippage des roulements à billes	3	5	12
Dessertissage des rotules de la bielle côté plateau	4	5	20
Dessertissage des rotules de la bielle côté piston	5	5	25

TABLE 4.2 – Evaluation de la criticité  $c$  des fautes des pompes hydrauliques, calculée à partir de leur fréquence  $f$  et de leur gravité  $g$ .

## 4.2 Modélisation de l'équipement et mise en forme du modèle pour les besoins du Health-monitoring

### 4.2.1 Modélisation du comportement nominal

La figure 4.10 présente un modèle linéaire simplifié de l'EHM. Tous les paramètres utilisés dans le modèle de l'EHA sont explicités en annexe 3.

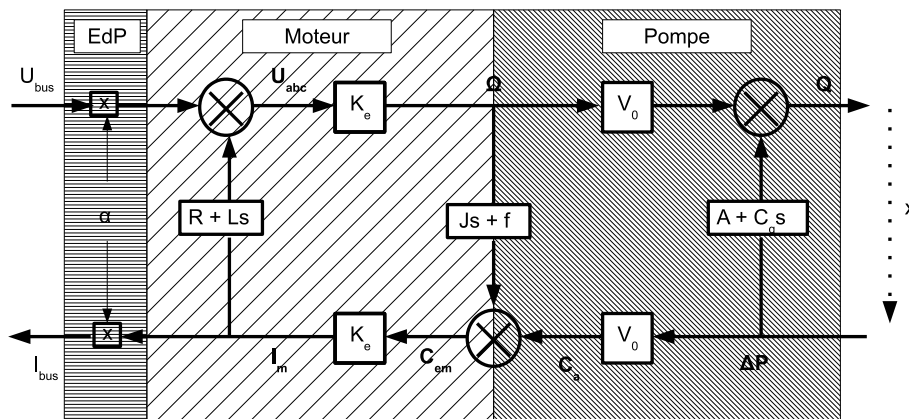


FIGURE 4.10 – Modélisation de l'ensemble moto-pompe : chaîne de transformation en vitesse, en effort, et interactions entre les deux.

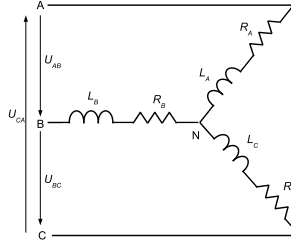


FIGURE 4.11 – Schéma des enroulements du stator

#### 4.2.1.1 Modélisation de la machine électrique

La loi des mailles appliquée aux enroulements du stator (voir la figure 4.11) fournit l'équation représentant le comportement électrique du moteur :

$$\begin{pmatrix} 1/Z_a & 0 & -1/Z_c \\ -1/Z_a & 1/Z_b & 0 \\ 0 & -1/Z_b & 1/Z_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{pmatrix} = 0 \quad (4.3)$$

avec  $Z_i = R_i + j\omega L_i$  l'impédance complexe de la phase  $i$ .

Le couple  $C_r$  provient de l'équation de conservation de puissance pour un moteur parfait (sans considérer les pertes) :

$$C_r \omega - \begin{pmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{pmatrix} (I_a \ I_b \ I_c) = 0 \quad (4.4)$$

avec  $\begin{pmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{pmatrix} = K_e \omega \begin{pmatrix} \cos(\theta_a) \\ \cos(\theta_a - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_a + 2\pi/3) \end{pmatrix}$  d'après la loi de Faraday pour l'induction qui stipule que la force électromotrice dans une bobine sujette à un champ magnétique dérive du flux magnétique :  $e = -\frac{d\phi}{dt}$

En isolant le rotor, on peut écrire le théorème du moment dynamique appliqué au rotor qui fournit l'équation représentant la relation entre la vitesse mécanique et le couple sur l'arbre en prenant en compte les pertes :

$$\Omega_a - \frac{C_a - C_r}{(j\omega J + K_f)} = 0 \quad (4.5)$$

La présence de  $j\omega$  est due au fait que l'on adopte un modèle complexe pour les signaux sinusoïdaux.

**Analyse géométrique** Les tensions induites et les flux magnétiques sont généralement considérés sinusoïdaux en mode nominal. Pour les étudier plus en détails, nous proposons un modèle géométrique générique de MSAP à  $n$  encoches et  $m$  aimants. Il s'appuie sur les dimensions angulaires de différents éléments du stator et du rotor :

- $\alpha$  pour une dent,  $\beta$  pour une encoche  $n(\alpha + \beta) = 2\pi$
- $\gamma$  pour un aimant et  $\delta$  pour l'espace inter-aimants  $m(\gamma + \delta) = 2\pi$

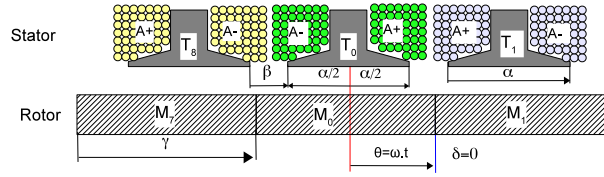


FIGURE 4.12 – Représentation linéaire de la machine 8-9.  $M_j$  sont les aimants,  $T_j$  sont les dents, et  $A+$  et  $A-$  sont les allers et retours des bobinages de la phase A.

La figure 4.12 montre le principe de cette modélisation sur la MSAP 8-9.

Avec cette représentation géométrique, le flux magnétique dans une dent peut être calculé via la surface des aimants situés en face d'une dent.

Le flux magnétique induit dans un enroulement est modélisé sous les hypothèses suivantes : pas de saturation, pas de fuite magnétique, et flux uniforme  $B_{max}$  créé par l'aimant.

Une analyse géométrique de la position de l'aimant en face de la bobine donne une bonne approximation du flux magnétique dans la bobine. Le flux total dans les trois bobines élémentaires d'une phase sera obtenu en sommant leurs flux individuels.

Le calcul est fait de manière générique pour un flux magnétique induit par un aimant  $M_0$  dans une dent  $T_0$ . La figure 4.13 illustre le principe de base du modèle. L'angle  $\theta$  représente l'angle entre le stator et le rotor. Son origine est choisie arbitrairement au centre de la dent pour le stator et au centre de l'espace inter-aimant pour le rotor. Le diamètre du rotor est  $d$  et la longueur d'aimant est  $l$ .

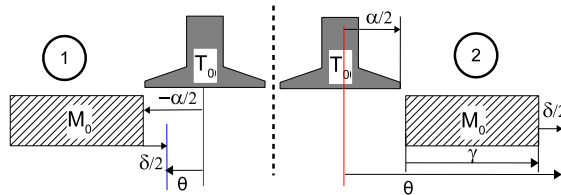


FIGURE 4.13 – Evolution de la surface de l'aimant en face d'une dent. Passage de l'aimant  $M_0$  devant la dent  $T_0$  de la position 1 à la position 2 pendant la rotation du rotor.

Soit  $S_{00}$  la surface de l'aimant  $M_0$  qui se trouve en face de la dent  $T_0$ .  $S_{00} \neq 0$  seulement entre les positions 1 et 2 comme le montre la figure 4.13, et son expression est :

$$\begin{cases} \theta \in \left[ \frac{\delta-\alpha}{2}, \frac{\delta+\alpha}{2} \right] & S_{00}(\theta) = ld\left(\theta - \left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right)\right) \\ \theta \in \left[ \frac{\delta+\alpha}{2}, \gamma + \frac{\delta-\alpha}{2} \right] & S_{00}(\theta) = ld(\alpha) \\ \theta \in \left[ \gamma + \frac{\delta-\alpha}{2}, \gamma + \frac{\delta+\alpha}{2} \right] & S_{00}(\theta) = ld\left(-\theta + \gamma + \frac{\delta+\alpha}{2}\right) \\ \theta \notin \left[ \frac{\delta-\alpha}{2}, \gamma + \frac{\delta+\alpha}{2} \right] & S_{00}(\theta) = 0 \end{cases}$$

La valeur du flux magnétique  $\phi_{00}$  produit par l'aimant  $M_0$  dans la dent  $T_0$  est proportionnel à la surface modélisée :  $\phi_{00}(\theta) = BS_{00}(\theta)$ .

Les autres aimants  $M_k$  produisent, en mode nominal, un flux magnétique similaire  $\phi_{k0}$  dans la dent  $T_0$  avec un déphasage de  $-k(\alpha + \beta)$ . Le flux total  $\Phi_0$  dans la dent  $T_0$  peut être calculé

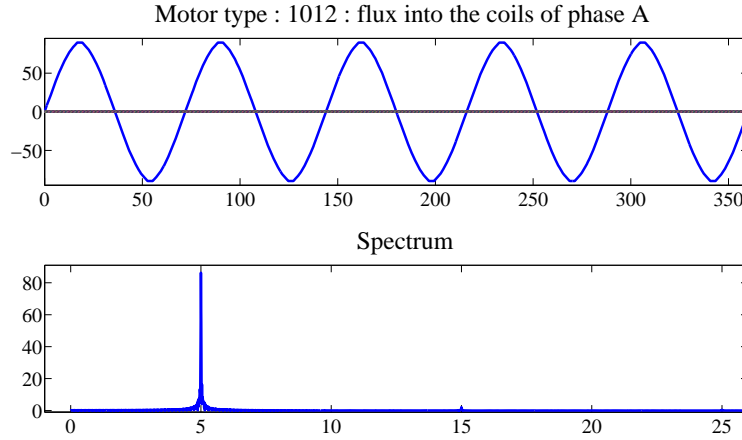


FIGURE 4.14 – Forme d'onde et spectre du flux dans une phase pour une machine 10-12 en mode nominal

comme la superposition de tous les flux élémentaires produits par les aimants, en prenant en considération le fait qu'ils sont polarisés (il y a des aimants sud et des aimants nord), pendant un tour complet du rotor.

$$\Phi_0(\theta) = \sum_{k=0}^{m-1} (-1)^k S_{00}(\theta - k \frac{2\pi}{m}) B$$

Le flux magnétique produit dans les autres dents peut être déduit de  $S_{00}(\theta)$  grâce à un déphasage. Pour la dent  $J$  le flux est :

$$\Phi_j(\theta) = S_{00}(\theta - j \frac{2\pi}{n}) B$$

Le flux magnétique produit dans une dent se reboucle dans les dents adjacentes.

Connaissant le flux dans les dents, et la séquence de bobinage du stator, le flux dans les enroulements élémentaires autour d'une dent peut être calculé, et le flux total vu par chaque phase en est déduit par sommation.

Ce modèle géométrique est implémenté sous Matlab. Il est paramétré par les 4 angles  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\delta$ , et peut donc être adapté à la typologie des différentes MSAP. La figure 4.14 montre la forme d'onde et le spectre du flux dans une phase, obtenus pour les machines 8-9 et 10-12 avec un rotor en bonne santé.

L'analyse fréquentielle montre que le flux magnétique peut être approximé par une fonction sinus puisque l'harmonique fondamental est largement prépondérant : son énergie est supérieure à 95% de l'énergie totale.

Une opération de dérivation donne finalement les valeurs des tensions induites par le rotor dans les trois phases.

Il apparaît que les résultats numériques sont semblables à ceux obtenus par les simulations sur les modèles à éléments finis obtenus avec FEMM ([Mee13]), un outil de simulation 3D utilisé largement dans l'industrie et notamment chez Messier-Bugatti-Dowty. L'un des avantages du

modèle géométrique est que les résultats sont obtenus en quelques secondes lorsque FEMM nécessite des simulations de plusieurs dizaines de minutes et des calculs sous licence coûteuse.

Remarque : nous choisissons de modéliser la machine via les paramètres courants et tensions plutôt que par les flux car se sont les paramètres qui sont accessibles expérimentalement.

#### 4.2.1.2 Modélisation de la pompe hydraulique

Les propriétés du fluide telles que sa viscosité, sa masse volumique, et sa compressibilité, dépendent bien sûr du type de fluide utilisé, ici du phosphate ester hydraulique aéronautique commercial (type Skydrol, Hyjet), mais aussi de la pression du fluide et de sa température. Ces effets sont négligés dans le modèle analytique simplifié pour ne pas surcharger les équations.

Considérons en premier lieu les transformations en vitesse.

La bielle  $i$  transforme le mouvement de rotation du plateau en mouvement de translation du piston  $i$ . L'équation modélisant cette transformation est :

$$V_i = \frac{dra}{2} \Omega_a \sin(\theta_i) \sin(\alpha) \quad (4.6)$$

avec  $\theta_i = \theta_a + \phi_i$ , où  $\phi_i = \frac{(i-1)360}{n}$

Cette équation est obtenue grâce à une étude géométrique de la position du piston  $X_i = dra(1 - \cos(\theta_i)) \sin(\alpha)$  (voir la figure 4.15).

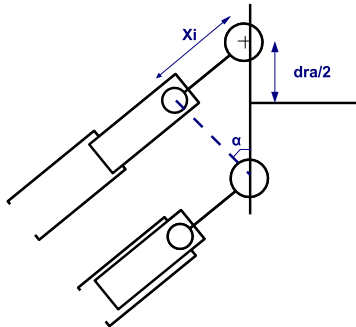


FIGURE 4.15 – Analyse géométrique du piston pour déterminer sa position  $X_i$  en fonction de l'angle de l'axe brisé de la pompe  $\alpha$  et du diamètre de répartition des grains sur l'arbre  $dra$

Considérons les aspects hydrauliques. D'après la figure 4.16 qui représente une vue du piston et de la distribution avec les différents débits existants, on peut définir 5 types génériques d'écoulement à travers des accidents géométriques que l'on peut voir comme des résistances hydrauliques.

On note  $A_p = \frac{\pi}{4}(d_p)^2$  l'aire du piston et  $A_O = \frac{\pi}{4}(d_0)^2$  l'aire de l'orifice de décharge.

On note  $A_{Ai}$  l'aire de la restriction entre la chambre du piston  $i$  et la lunule A,  $A_{Bi}$  l'aire de la restriction entre la chambre du piston  $i$  et la lunule B.

Pour simplifier la géométrie complexe de la pompe, elle est considérée sous forme de modèle à paramètres localisés, comme une succession de volumes à pression uniforme et homogènes séparés par des résistances hydrauliques (voir la figure 4.17).

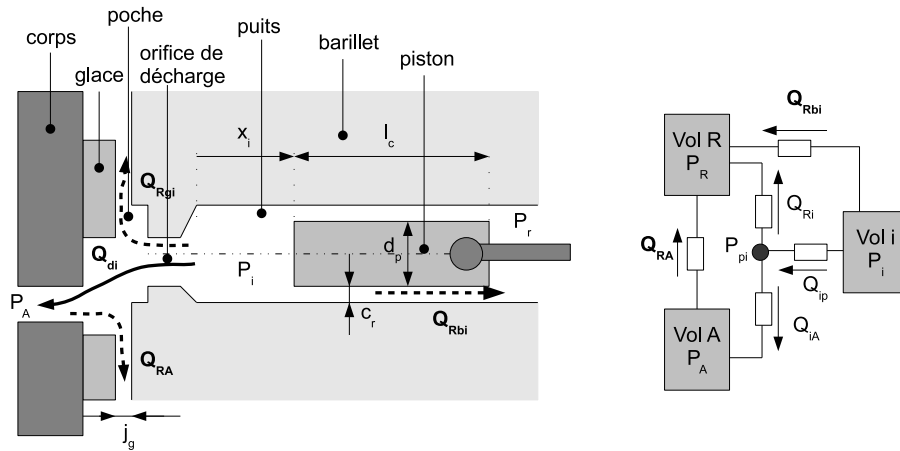


FIGURE 4.16 – Représentation du piston dans le puits de barillet sous forme schématique puis comme une succession de volumes et de restrictions

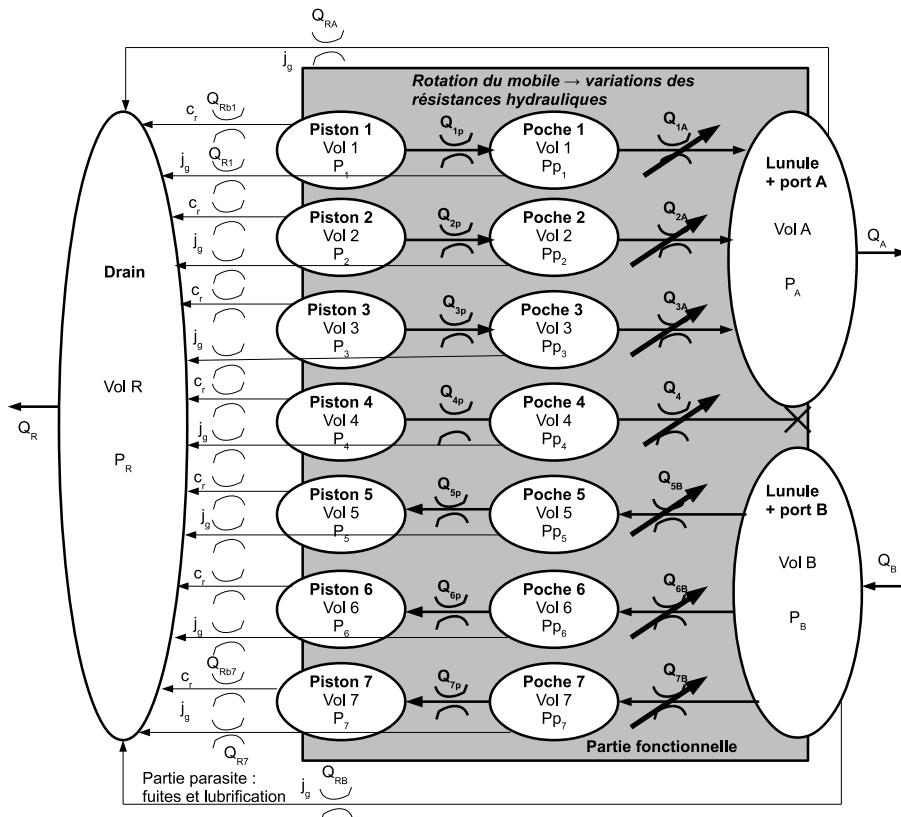


FIGURE 4.17 – Proposition de représentation du mobile de la pompe comme une succession de volumes et de restrictions

La difficulté est surtout d'expliciter les débits échangés entre deux volumes car le modèle de la résistance hydraulique est extrêmement simplifié du fait du passage de la réalité 3D au modèle 1D.

Estimons les débits représentés sur la figure 4.16. Le débit de fuite à travers le jeu  $c_{ri}$  entre le piston et le barillet est laminaire car la longueur du piston est très grande devant la largeur du jeu. Il est donc calculé comme dans le formulaire [Uni08] avec une excentricité nulle (on considère



le piston centré dans le puits).

$$Q_{rbi} = -\pi \frac{dx_i}{dt} \frac{d_p}{2} c_{ri} + \frac{\pi d_p c_{ri}^3}{12 \rho \nu l_c} (P_i - P_R) \quad (4.7)$$

Nous voyons qu'au niveau des débits du puits vers le port A (partie fonctionnelle) et vers le drain à travers le jeu glace/barillet (parasite) nous avons à faire à la poche (toujours se référer à la figure 4.16), qui ne fait pas partie des domaines à pression homogène et uniforme initiaux, mais qui peut être représentée comme un noeud hydraulique. Nous avons donc trois résistances hydrauliques à ce niveau là, correspondant à 3 débits.

Le débit  $Q_{ip}$  est le débit du puits vers la poche. A ce niveau là il y a une perturbation locale de l'écoulement, qui devient très rapidement turbulent. L'équation générique modélisant ce phénomène est :

$$Q_{ip} = C_q A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_i - P_{pi}|} \text{sgn}(P_i - P_{pi}) \quad (4.8)$$

où  $C_q$  est le coefficient de débit représentatif de la géométrie de la poche. Il est inconnu a priori, mais il est invariant sur la vie de la pompe ( $C_q \in [0.6, 0.9]$ ) dès lors que l'écoulement est turbulent.

Le débit  $Q_{Ri}$  de la poche vers le drain en passant par le jeu entre la glace et le barillet est calculé comme chez [Uni08] tel un flux de fuite entre deux plans.

$$Q_{Ri} = \frac{j_g^3}{12 \rho \nu} \left( \frac{L_a}{a} + \frac{L_b}{b} \right) (P_{pi} - P_R) \quad (4.9)$$

où les dimensions  $L_a, L_b, a, b$  sont définies comme sur la figure 4.18, elles sont connues et invariantes au cours de la vie. Il y a bien deux chemins possibles : par le petit diamètre de la glace (côté a) et par le grand diamètre de la glace (côté b).

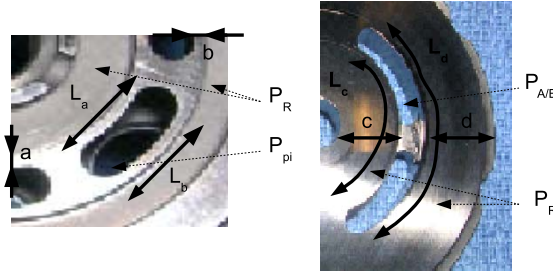


FIGURE 4.18 – dimensions pour le calcul des fuites entre la glace et le barillet

Le débit entre la poche et le port A (ou B) est à nouveau modélisé par une équation de type :

$$Q_{iA} = C_{qiA} A_{Ai} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{pi} - P_A|} \text{sgn}(P_{pi} - P_A) \quad (4.10)$$

D'après la géométrie de la lunule et du port on a  $C_{qiA} \in [0.68, 0.75]$ , sa valeur exacte est inconnue a priori mais invariante au cours de la vie. La surface de passage offerte au fluide considérée dépend du regard entre la lunule et le port, et donc de la position angulaire du piston. Cette surface est connue par conception, aux tolérances de fabrication près.

Plus précisément on a :  $A_{Ai} = s_{Ai-nor} A_{max}$ , où le signal de modulation de l'aire  $s_{Ai-nor}$  dépend de la position angulaire du piston par rapport à la lunule :

$$s_{Ai} = \begin{cases} a\theta_{Ai} & \text{si } \theta_{Ai} \in [0, \theta_{min}] \\ 1 & \text{si } \theta_{Ai} \in [\theta_{min}, \theta_{max}] \\ a\theta_{Ai} + b & \text{si } \theta_{Ai} \in [\theta_{max}, 180] \end{cases}$$

où  $\theta_{Ai}$  est l'angle  $\theta_i$  ramené entre 0 et 180 degrés. Le signal de modulation est saturé entre 0 et 1.

$$s_{Ai-nor} = \begin{cases} 0 & \text{si } s_{Ai} \leq 0 \\ 1 & \text{si } s_{Ai} \geq 1 \\ s_{Ai} & \text{sinon} \end{cases}$$

Le débit de fuite  $Q_{RA}$  du port vers le drain est calculé de la même manière que le débit de fuite  $Q_{Ri}$  du puits vers le drain, avec des dimensions différentes. Il en va de même pour le débit de fuite  $Q_{RB}$ .

$$Q_{RA} = \frac{j_g^3}{12\rho\nu} \left( \frac{L_c}{c} + \frac{L_d}{d} \right) (P_A - P_R) \quad (4.11)$$

$$Q_{RB} = \frac{j_g^3}{12\rho\nu} \left( \frac{L_c}{c} + \frac{L_d}{d} \right) (P_B - P_R) \quad (4.12)$$

Les équations de continuité sur les différents domaines sont maintenant déterminées à partir de la figure 4.17, qui fait le bilan des volumes et résistances hydrauliques modélisées.

Dans un domaine à pression uniforme et homogène, la relation de conservation de la masse représente l'évolution des pressions et débits via  $\frac{dM}{dt} = M_{entrant} - M_{sortant}$  soit  $\frac{d\rho V}{dt} = \rho Q_{entrant} - \rho Q_{sortant}$ . Comme la densité  $\rho$  varie peu mais vite on a finalement :

$$\sum Q_{entrant} - \sum Q_{sortant} = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{B} \frac{dP}{dt} \quad (4.13)$$

La partie avec la variation de volume est la partie fonctionnelle tandis que la partie avec le coefficient de compressibilité  $B$  est la partie parasite et modélise la compressibilité du fluide.

Pour le drain, le débit fonctionnel est nul car il n'y a pas de variation de volume (nous négligeons le pompage côté arrière des pistons), et l'équation de continuité devient :

$$\sum_{i=1}^7 (Q_{Ri} + Q_{Rbi}) + Q_{RA} + Q_{RB} = \frac{V_R}{B_R} \frac{dP_R}{dt} \quad (4.14)$$

Pour le domaine A, on n'a toujours pas de variation de volume fonctionnelle :

$$\sum_{i=1}^7 Q_{iA} - Q_{RA} - Q_A = \frac{V_A}{B_A} \frac{dP_A}{dt} \quad (4.15)$$

L'équation est identique pour le domaine B :

$$\sum_{i=1}^7 Q_{iB} - Q_{RB} - Q_B = \frac{V_B}{B_B} \frac{dP_B}{dt} \quad (4.16)$$

Pour le domaine représentant la chambre du piston, le débit fonctionnel est créé par l'augmentation et la diminution de son volume. L'équation de continuité s'écrit :

$$-Q_{ip} - Q_{Rbi} = S \frac{dx_i}{dt} + \frac{V_i}{B_i} \frac{dP_i}{dt} \quad (4.17)$$

Le volume de la chambre est variable et dépend de la position du piston dans sa chambre :  $Vol_i = Vol_0 + A_p X_i$ . Via  $X_i$ , le volume dépend directement de l'angle  $\theta_i$ .

Enfin, au niveau de la poche i, il n'y a pas de variation de volume car le jeu glace/barillet est considéré constant, et le terme lié à la compressibilité du fluide est négligé car il introduit un effet dynamique à haute fréquence dans ce très faible volume, donc l'équation de continuité est :

$$Q_{ip} + Q_{iB} - Q_{iA} - Q_{Ri} = 0 \quad (4.18)$$

Considérons maintenant les transformations en effort.

L'équation modélisant la transformation de la pression du fluide en force d'un seul piston sur la bielle est :

$$F_i = P_i A_p + \frac{\pi \nu d_p l_c}{c_{ri}} V_i \quad (4.19)$$

où le premier terme représente la partie fonctionnelle et le second terme est relatif au frottement visqueux entre le piston et le puits de barillet.

La force  $F_u$  exercée par les pistons sur l'arbre est alors  $F_u = \sum_{i=1}^7 F_i$ .

Le couple est ensuite calculé géométriquement à partir de la force et grâce à la relation cinématique 4.6 :

$$C_u = \frac{dra}{2} \sin(\theta_i) \sin(\alpha) F_u \quad (4.20)$$

Côté engrenage, les pertes mécaniques inconnues sont prises en compte sous une forme forfaitaire, qui est recalée grâce aux essais. La valeur du couple  $C_p$  exercé par l'engrenage sur l'arbre est donc imposée dans notre modèle.

Finalement le couple exercé sur l'arbre est la somme du couple  $C_u$  exercé par les biellettes et du couple  $C_p$  exercé via l'engrenage :

$$C_a = C_p + C_u \quad (4.21)$$

#### 4.2.1.3 Modélisation de l'environnement de l'ensemble moto-pompe

Le vérin n'appartient pas à l'EHM mais il est tout de même modélisé ici car l'observation de ses paramètres, et notamment les efforts transmis à la charge et la vitesse de charge, est intéressante pour estimer le différentiel de pression ainsi que le débit du fluide au niveau des ports de la pompe. Ceci est utile pour le Health-Monitoring de l'ensemble moto-pompe.

Les équations de conservation du fluide dans les chambres A et B du vérin donnent :

$$Q_A - 0 = S_v V_v + \frac{V_A}{B_A} \frac{dP_A}{dt}$$

et  $0 - Q_B = -S_v V_v + \frac{V_B}{B_B} \frac{dP_B}{dt}$  d'où l'équation sur les vitesses :

$$Q_A + Q_B = 2S_v V_v + 2 \frac{V_A}{B_A} \frac{dP_A}{dt} + 2 \frac{V_B}{B_B} \frac{dP_B}{dt} \quad (4.22)$$

avec  $V_A = V_{A0} + SX_v$  et  $V_B = V_{B0} - SX_v$ , où on peut considérer que  $SX_v \ll V_{A/B0}$  pour enlever le terme non linéaire de l'équation.

Le bilan des forces s'exerçant sur le piston fournit l'équation sur les efforts :

$$F_v + (P_A - P_B)S - C_v V_v = M_{tige} \frac{d^2 X_v}{dt^2} = 0 \quad (4.23)$$

L'effort inertiel lié à la masse de la tige est négligé par rapport aux autres efforts en présence.

## 4.2.2 Mise en forme du modèle pour les besoins de l'implémentation des stratégies Health Monitoring

Le modèle de l'EHM est mis en forme de manière à correspondre au cadre de modélisation formel présenté chapitre 2, comme le montre la figure 4.19.

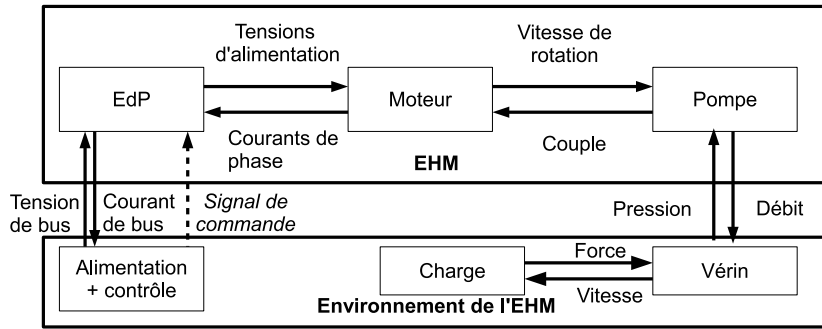


FIGURE 4.19 – Composants et paramètres d'échanges de l'EHM

L'EHM est constitué de trois composants, l'EdP, le moteur, et la pompe, qui sont décrits dans les prochains paragraphes. L'EHM est connecté avec l'alimentation électrique côté EdP, et avec le vérin, lui même connecté à la charge, côté pompe hydraulique.

Les paramètres d'entrée/sortie de l'EHM, qui sont les paramètres d'échange avec l'environnement, sont écrits avec un exposant  $EHM$ .

- $\mathcal{IP}^{EHM} = \{U_{bus}^{EHM}, \alpha_m^{EHM}, P_A^{EHM}, P_B^{EHM}\}$
- $\mathcal{OP}^{EHM} = \{I_{bus}^{EHM}, Q_A^{EHM}, Q_B^{EHM}\}$

Les composants sont présentés plus en détail dans les paragraphes suivants.

### 4.2.2.1 La machine électrique

Pour simplifier, nous modélisons le moteur comme un assemblage de 3 composants, comme le montre la figure 4.20. Le stator, le rotor, et l'arbre, sont les composants qui interviennent directement dans la chaîne de transformations des tensions en vitesse de rotation.

Les composants sont modélisés comme suit :

- les paramètres du stator sont notés avec l'exposant  $s$  :
  - $\mathcal{IP}^s = \{E_a^s, E_b^s, E_c^s, U_{ab}^s, U_{bc}^s, U_{ca}^s\}$
  - $\mathcal{PP}^s = \{Z_a^s, Z_b^s, Z_c^s\}$

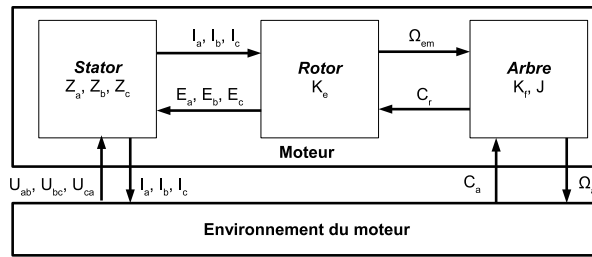


FIGURE 4.20 – Composants et paramètres du moteur

- $\mathcal{OP}^s = \{I_a^s, I_b^s, I_c^s\}$
- les paramètres du rotor sont notés avec l'exposant  $r$  :
  - $\mathcal{IP}^r = \{I_a^r, I_b^r, I_c^r, \theta_a^r, \Omega^r\}$
  - $\mathcal{PP}^r = \{K_e^r\}$
  - $\mathcal{OP}^r = \{E_a^r, E_b^r, E_c^r, C_r^r\}$
- les paramètres de l'arbre sont notés avec l'exposant  $a$  :
  - $\mathcal{IP}^a = \{C_r^a, C_a^a\}$
  - $\mathcal{PP}^a = \{K_f^a, J^a\}$
  - $\mathcal{OP}^a = \{\theta_a^a, \Omega^a\}$

#### 4.2.2.2 La pompe hydraulique

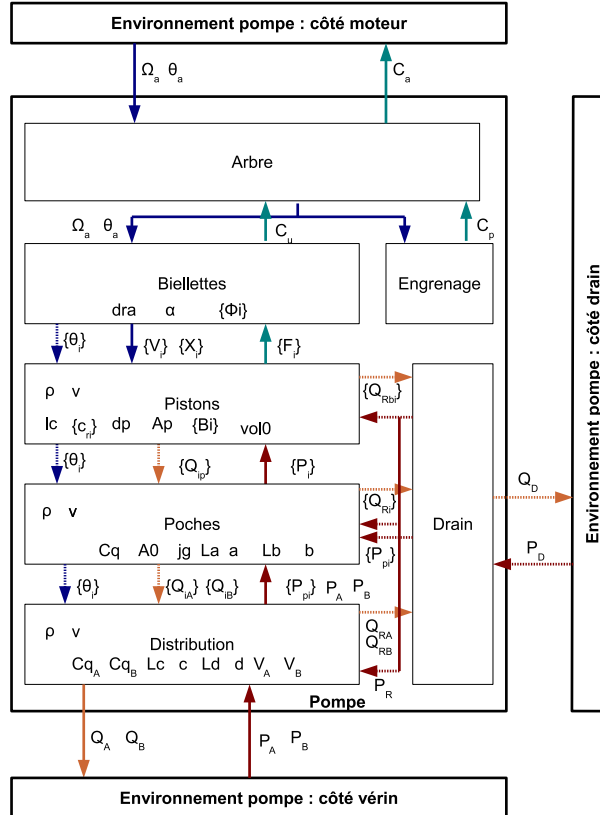


FIGURE 4.21 – Composants et paramètres de la pompe

Comme montré sur la figure 4.21, la pompe est composée de plusieurs composants :

- L'arbre
- L'engrenage
- L'ensemble des biellettes
- L'ensemble des pistons
- L'ensemble des poches
- La distribution
- Le drain

**L'arbre** Les paramètres de l'arbre sont exprimés avec l'exposant  $t$ .

- $\mathcal{IP}^{ci} = \{C_u^t, \Omega_a^t, C_p^t\}$
- $\mathcal{PP}^{ci} = \{\emptyset\}$
- $\mathcal{OP}^{ci} = \{C_a^t, \Omega_a^t\}$

L'équation entre les paramètres de l'arbre est l'équation 4.21

**Les biellettes** La pompe comporte 7 biellettes. Elles ont toutes le même modèle. Les paramètres de la biellette  $i$  sont notés avec l'exposant  $bi$

- $\mathcal{IP}^{bi} = \{F_i^{bi}, \Omega_a^{bi}, \theta_a^{bi}\}$
- $\mathcal{PP}^{bi} = \{dra^{bi}, \phi_i^{bi}, \alpha^{bi}\}$
- $\mathcal{OP}^{bi} = \{V_i^{bi}, X_i^{bi}, \theta_i^{bi}, C_u^{bi}\}$

Les équations entre les paramètres des biellettes sont les équations 4.6 et 4.20.

**Les pistons** Les paramètres du piston  $i$  sont notés avec l'exposant  $pi$

- $\mathcal{IP}^{pi} = \{V_i^{pi}, X_i^{pi}, \theta_i^{pi}, P_i^{pi}, P_R^{pi}\}$
- $\mathcal{PP}^{pi} = \{d_p^{pi}, l_c^{pi}, c_{ri}^{pi}, A_p^{pi}, Vol_0^{pi}, B_i^{pi}, \rho_i^{pi}, \nu^{pi}\}$
- $\mathcal{OP}^{pi} = \{\theta_i^{pi}, F_i^{pi}, Q_{Rbi}^{pi}, Q_{ip}^{pi}\}$

Les équations entre les paramètres des pistons sont les équations 4.7, 4.17, 4.19.

**Les poches** Les paramètres des poches sont notés avec l'exposant  $po$ .

- $\mathcal{IP}^{po} = \{\theta_i^{po}, Q_{ip}^{po}, P_{pi}^{po}, P_A^{po}, P_B^{po}, P_R^{po}\}$
- $\mathcal{PP}^{po} = \{C_q^{po}, A_0^{po}, j_g^{po}, L_a^{po}, a^{po}, L_b^{po}, b^{po}, \rho^{po}, \nu^{po}\}$
- $\mathcal{OP}^{po} = \{\theta_i^{po}, Q_{iA}^{po}, Q_{iB}^{po}, Q_{Ri}^{po}, P_i^{po}\}$

Les équations entre les paramètres des poches sont les équations 4.8, 4.9, 4.18.

**La distribution** Les paramètres de la distribution sont notés avec l'exposant  $d$ .

- $\mathcal{IP}^d = \{Q_{iA}^d, Q_{iB}^d, \theta_i^d, P_A^d, P_B^d, P_R^d\}$
- $\mathcal{PP}^d = \{C_{qA}^d, C_{qB}^d, L_c^d, c^d, L_d^d, d^d, V_A^d, V_B^d, \rho^d, \nu^d\}$
- $\mathcal{OP}^d = \{Q_{RA}^d, Q_{Rb}^d, Q_A^d, Q_B^d, P_A^d, P_B^d, \{P_{pi}^d\}\}$

Les équations entre les paramètres de la distribution sont les équations 4.10, 4.11, 4.12, 4.15, 4.16.

**Le drain** Les paramètres du drain sont notés avec l'exposant  $r$ .

- $\mathcal{IP}^{re} = \{\{Q_{rbi}^{re}\}, \{Q_{Ri}^{re}\}, Q_{RA}^{re}, Q_{RB}^{re}\}$
- $\mathcal{PP}^{re} = \{\emptyset\}$

-  $\mathcal{OP}^{re} = \{P_R^{re}, \{P_{pi}^{re}\}\}$

L'équation entre les paramètres du drain est l'équation 4.14.

**L'engrenage** Les paramètres de l'engrenage sont notés avec l'exposant *en*.

-  $\mathcal{IP}^{re} = \{\Omega_a^{en}\}$

-  $\mathcal{OP}^{re} = \{C_u^{en}\}$

Ses paramètres privés sont mal connus. Dans les faits la valeur du couple de sortie  $C_p$  est choisi pour imposer le rendement mécanique connu de par l'expérience (pour rappel, le rendement mécanique est le rapport entre le couple théorique et le couple réel de l'arbre de la pompe, donc une valeur judicieusement choisie de  $C_p$  permet d'obtenir la valeur attendue pour  $C_a$ ).

#### 4.2.2.3 L'environnement de l'ensemble moto-pompe

**L'électronique de puissance** Les paramètres privés et les relations *ar* entre les différents paramètres ne sont pas explicités ici car l'EdP ne fait pas partie des composants dont nous souhaitons suivre l'état de santé, seuls ses paramètres d'échange avec l'environnement (et notamment avec le moteur) sont explicités. L'électronique de puissance est représentée sur la figure 4.22.

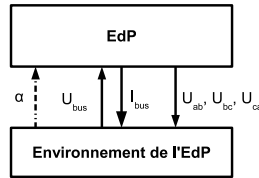


FIGURE 4.22 – Composants et paramètres de l'électronique de puissance

Les paramètres de l'EdP sont écrits avec un exposant *e*.

-  $\mathcal{IP}^e = \{U_{bus}^e, \Omega_{ref}^e\}$

-  $\mathcal{PP}^e = \{\dots\}$

-  $\mathcal{OP}^e = \{I_{bus}^e, U_{ab}^e, U_{bc}^e, U_{ca}^e\}$

**Le vérin** De même que pour l'EdP nous ne modélisons pas en détails le vérin. Il est représenté sur la figure 4.23.

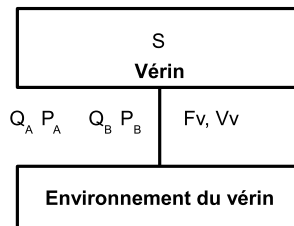


FIGURE 4.23 – Composants et paramètres du vérin

-  $\mathcal{IP}^v = \{Q_A^v, Q_B^v, F_v^v\}$

-  $\mathcal{PP}^v = \{S^v\}$

-  $\mathcal{OP}^v = \{V_v^v, P_A^v, P_B^v\}$

#### 4.2.2.4 Structure des composants

**La structure** La structure est définie ainsi  $E_a^s = st(E_a^r)$ , il en va de même pour tous les paramètres de mêmes noms mais d'exposants différents, l'exposant correspondant au nom du composant. Par exemple pour le moteur le rotor et le stator sont structurellement liés via les courants et les tensions induites. Le rotor et l'arbre sont structurellement liés via le couple. L'environnement est structurellement lié au stator via les tensions d'alimentation et à l'arbre via la vitesse mécanique.

**Les rangs des paramètres** Les paramètres représentant des signaux tels que tensions, courants, couple et vitesse ont des rangs qui définissent à la fois leur amplitude, leur fréquence, et leur phase, afin de les décrire parfaitement. Des intervalles de valeurs sont définis pour chacun de ces critères.

$$r(I, V, E, \Omega \dots) = ([amplitude_{min}, amplitude_{max}], [fréquence_{min}, fréquence_{max}], [phase_{min}, phase_{max}]).$$

Les paramètres représentant des caractéristiques physiques tels que résistance, inductance, coefficient de frottement, ont des rangs de type intervalle de valeurs réelles avec une borne inférieure et une borne supérieure.  $r(R, L, K \dots) = [min, max]$ .

#### 4.2.2.5 Analyse fonctionnelle

La fonction de l'EHA est  $Fu^{EHA}$  : déplacer le vérin à la vitesse de référence quelle que soit la force exercée par la charge. Pour réaliser cette fonction objectif, plusieurs fonctions sont nécessaires, réalisées par les composants de l'EHA.

La fonction de l'électronique de puissance est  $Fu^{edP}$  : produire un système de tensions triphasé équilibré conforme au signal de commande quelles que soient les perturbations.

La fonction du moteur est  $Fu^{moteur}$  : produire une vitesse de rotation conforme aux tensions d'alimentation quel que soit le couple exercé sur l'arbre du moteur par l'environnement.

Le moteur est composé de 3 composants : le stator, le rotor, et l'arbre. Chaque composant réalise une fonction élémentaire :

- La fonction du stator est  $Fu^{stator}$  : produire un système de courants triphasé équilibré conforme aux tensions d'alimentation quelles que soient les tensions induites.
- La fonction du rotor est  $Fu^{rotor}$  : produire une vitesse de rotation du champ électromagnétique conforme aux courants de phase quel que soit le couple développé.
- La fonction de l'arbre est  $Fu^{arbre}$  : produire une vitesse de rotation de l'arbre conforme à la vitesse mécanique quel que soit le couple exercé sur l'arbre par l'environnement.

La fonction du moteur est composée des fonctions de ses composants :

$$Fu^{moteur} = Fu^{stator} \wedge Fu^{rotor} \wedge Fu^{arbre}$$

La fonction de la pompe est  $Fu^{pompe}$  : produire un débit de fluide conforme à la vitesse de rotation de son arbre quelle que soit la pression exercée par l'environnement sur les ports d'entrée/sortie.

Les composants de la pompe réalisent les fonctions élémentaires.

- La fonction de l'arbre (ou transmission mécanique) est  $Fu^{transmission}$  : transmettre la vitesse de rotation de l'arbre à la partie mobile de la pompe quelles que soient les pertes de couple.



- Il y a plusieurs biellettes équipées (biellette + piston/puits de barillet + poche). La fonction de la biellette équipée de son piston  $i$  est  $Fu^{biellette-i}$  : transformer la vitesse de rotation de l'arbre en mouvement de pompage pour créer un débit dans le puits de barillet vers la distribution, quelle que soit la pression imposée par l'environnement. Cette fonction est composée de deux fonctions :

- $Fu^{biellette-i-1}$  : déplacer axialement le piston par rapport au barillet conformément à la vitesse de rotation de l'arbre, quelle que soit la pression exercée par le fluide sur le piston. Cette fonction est réalisée par la biellette.
- $Fu^{biellette-i-2}$  : transformer la vitesse de translation du piston en débit dans le puits de barillet vers la distribution, quelle que soit la pression exercée par le fluide sur le piston. Cette fonction est réalisée par la partie piston/puits de barillet et poche.

Si  $Fu^{biellettes}$  est la fonction associée à l'ensemble des 7 biellettes équipées, alors :

$$Fu^{biellettes} = Fu^{biellette1-1} \wedge Fu^{biellette1-2} \wedge Fu^{biellette2-1} \wedge \dots \wedge Fu^{biellette7-1} \wedge Fu^{biellette7-2}$$

- La fonction de la distribution est  $Fu^{distribution}$  : fournir un débit de fluide vers les ports A et B de la pompe conformément aux débits dans les poches, quelles que soient les pressions du fluide au niveau des ports A et B et quelles que soient les perturbations.

La fonction de la pompe est composée des fonctions de ses composants :  $Fu^{pompe} = Fu^{arbre-pompe} \wedge Fu^{biellettes} \wedge Fu^{distribution}$

La fonction du vérin est  $Fu^{verin}$  : transformer le débit de pompe en vitesse de translation quelle que soit la force exercée par la charge.

Finalement la fonction de l'EHA est composée des fonctions de ses composants :

$$Fu^{EHA} = Fu^{edP} \wedge Fu^{moteur} \wedge Fu^{pompe} \wedge Fu^{verin} \quad (4.24)$$

Il n'y a pas de redondance fonctionnelle au sein de l'actionneur.

L'arbre des fonctions de l'EHA est représenté sur la figure 4.24

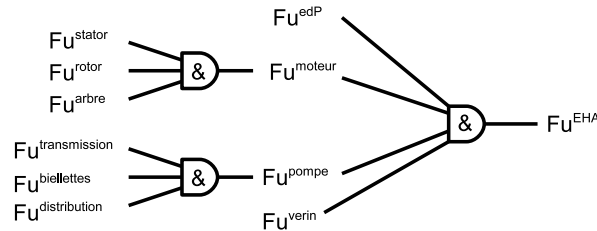


FIGURE 4.24 – Arbre des fonctions de l'EHA

#### 4.2.2.6 Identification des observables du système

Les capteurs présents sur les actionneurs EHA actuellement en service au niveau du moteur et de la pompe sont les suivants :

- pour le moteur :
  - deux capteurs de température du moteur de type Pt100, situés sur deux des phases statiques ;
  - un capteur de température de l'huile dans le carter du moteur ;

- deux capteurs de position du moteur, chacun constitué de deux sondes à effet Hall (HES) de type linéaire, situés au niveau du rotor, d'où une reconstruction possible de la vitesse du moteur ;
- un capteur du courant statorique actif  $I_q$ , qui permet la reconstruction du couple électromagnétique qui lui est proportionnel ;
- pour la pompe et le circuit hydraulique :
  - un capteur basse pression dans le circuit retour ;
  - un capteur de pression mesurant la différence de pression entre les chambres du vérin ;
  - un capteur de position de la tige par rapport au corps du vérin, qui laisse la possibilité d'une reconstruction de la vitesse du vérin et du débit utile vérin.

Cette identification permet de déterminer les données observables à partir desquelles pourraient être créés des résidus.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté et expliqué le comportement de l'ensemble moto-pompe dans son environnement, l'actionneur électro-hydrostatique, également constitué d'une électronique de puissance et d'un vérin hydraulique. Deux types de moteurs différents sont présentés précisément, l'un à 10 pôles et 12 encoches, l'autre à 8 pôles et 9 encoches. La pompe hydraulique considérée est une pompe à cylindrée fixe, à 7 pistons axiaux, à axe brisé. Une étude de type AMDEC nous a permis de sélectionner les défaillances critiques à diagnostiquer/pronostiquer pour ces composants.

Les comportements nominaux du moteur et la pompe ont été modélisés grâce aux lois de la physique. Les modèles ont ensuite pu être mis en forme dans le cadre de modélisation que nous avons proposé au chapitre 2, ce qui montre que le cadre est adapté à la fois aux composants électriques et aux composants hydrauliques. L'arbre des fonctions de l'actionneur a été construit à partir de ce modèle. Le chapitre suivant présente la méthode de suivi de l'état de santé appliquée à l'ensemble moto-pompe.



**Résumé :** ce chapitre présente l'application de la méthode formelle de diagnostic et pronostic développée dans les chapitres 2 et 3 à l'ensemble moto-pompe décrit dans le chapitre 4. La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est tout d'abord étudiée, un état de l'art sur le diagnostic et le pronostic des courts-circuits entre spires d'une même phase et de la désaimantation partielle du rotor nous permet de prendre connaissance des travaux réalisés dans ce domaine. Les deux défauts sont ensuite modélisés, et l'automate des modes de la MSAP est construit. Des résidus de faute, que nous construisons suite à une étude analytique, permettent d'appliquer l'algorithme de diagnostic à la MSAP, sur prototype virtuel et en essais. Malgré les manques de données de vieillissement, des lois de vieillissement fictives mais réalistes permettent d'appliquer l'algorithme de pronostic sur prototype virtuel. Le second composant critique, la pompe hydraulique, est ensuite étudié. Les efforts portent cette fois essentiellement sur la modélisation, avec l'objectif de construire un prototype virtuel de pompe hydraulique qui permette de représenter des phénomènes locaux et sur lequel pourront à terme être implémentés les modèles des fautes sélectionnées. En attendant, des méthodes de diagnostic sans modèle sont proposées.

## Introduction

La méthode de Health-Monitoring présentée dans les chapitres 2 et 3 est maintenant appliquée au module moto-pompe décrit dans le chapitre 4. Dans le cas d'un système complexe résultant d'un assemblage de composants hétérogènes, il est nécessaire de surveiller de manière graduelle chaque composant pour pouvoir établir une décision d'action de maintenance pour le système global. C'est pourquoi nous abordons tout d'abord en détails le suivi de l'état de santé du moteur électrique dans la section 5.1, puis plus brièvement celui de la pompe hydraulique dans la section 5.2.

### 5.1 Le suivi de l'état de santé du moteur électrique

Dans cette section, les deux fautes progressives sélectionnées dans le paragraphe 4.1.4.1, à savoir les courts-circuits entre spires et la désaimantation partielle du rotor, sont caractérisées et modélisées, et des résidus de faute sont construits. L'évolution de ces fautes en fonction du stress est ensuite étudiée et modélisée. Cela permet de construire l'automate des modes de la MSAP et d'appliquer les algorithmes de diagnostic et pronostic, en simulation et en essais.

Une partie de nos travaux sur les MSAP sont présentés dans deux publications : [VCP12] et [VCPR12].

### 5.1.1 Les courts-circuits entre spires

Les courts-circuits entre spires sont tout d'abord caractérisés, afin de comprendre leur mécanisme et leurs conséquences. Un modèle analytique de court-circuit est construit à partir du modèle nominal développé dans le chapitre 4, ce qui permet de construire analytiquement un résidu dédié aux courts-circuits. L'évolution des courts-circuits dans le temps est étudiée et modélisée par une loi physique. Finalement, le modèle est mis en forme dans le cadre générique formel de modélisation. Cela nous amène à la détection et l'identification des courts-circuits entre spires grâce au résidu, tout d'abord sur un prototype virtuel de MSAP court-circuitée que nous développons, puis en essais.

#### 5.1.1.1 Caractérisation des courts-circuit entre spires

Chaque phase du stator est constituée d'un ou plusieurs enroulements connectés en série, chacun constitué d'un certain nombre de spires. Plusieurs méthodes d'isolation sont combinées pour protéger électriquement les enroulements. Chaque spire est protégée et isolée grâce à du vernis d'imprégnation, qui est l'isolation primaire. Chaque bobinage peut ensuite être protégé par une résine dans l'encoche. Il y a ensuite plusieurs sortes d'isolation d'encoche : entre les phases si plusieurs phases se trouvent dans la même encoche, et entre la ou les phases et la masse. L'isolant d'encoche se présente en général sous la forme de papier isolant. Les parties les plus sensibles du stator sont les têtes de bobines car elles ne sont pas protégées dans les encoches et car ce sont les endroits où il y a potentiellement le plus de contacts entre phases. Cependant un isolant spécifique est ajouté à ce niveau-là également. Finalement, les sorties du bobinage sont aussi isolés électriquement.

Lorsque l'un des isolants est endommagé, cela peut entraîner des courts-circuits : une circulation de courant électrique non désirée prend place dans l'isolant endommagé. Les courts-circuits arrivent fréquemment dans le stator, et leurs conséquences sont très graves : elles peuvent entraîner la perte de fonction de la MSAP mais aussi la destruction du stator et même de la machine. Il y a différents courts-circuits statorique :

- entre une phase et le châssis. Ses conséquences sont dramatiques, mais c'est le court-circuit le moins fréquent puisque la frontière entre les enroulements et la carcasse est très bien isolée ;
- entre deux phases, ce qui arrive spécialement si il y a deux phases différentes dans une même encoche, ou alors au niveau des têtes de bobines ;
- entre spires d'une même phase. C'est le court-circuit le plus fréquent puisque l'isolation entre spires est la plus fine pour des raisons de compacité, et les tensions entre spires peuvent pourtant être très importantes, notamment entre les premières et les dernières spires.

Les deux premiers types de court-circuit conduisent très rapidement à une défaillance et à la dégradation matérielle. De plus, ce sont les moins fréquents. Les courts-circuits entre spires sont retenus pour notre étude car les conséquences peuvent être légères à l'initiation de la faute et augmenter au fil du temps, ce qui laisse le temps de les détecter. La méthode appliquée pour les courts-circuits entre spires pourrait aussi être appliquée pour les autres types de court-circuit comme nous le verrons par la suite.

Les courts-circuits entre spires sont une conséquence de la dégradation de l'isolation de spire, qui augmente le risque de décharges partielles et/ou d'effet corona, ce qui augmente encore la dégradation de l'isolant. Dès que ce phénomène se met en place, un cercle vicieux s'installe. Une

décharge partielle est une décharge électrique localisée qui court-circuite partiellement l'isolant séparant les conducteurs sous l'effet d'une forte différence de tension entre les conducteurs. Cette différence de tension entre les conducteurs d'une même phase est liée à la durée de propagation du front de tension appliqué en entrée de la phase. On lit souvent que les décharges partielles ont lieu à l'intérieur de l'isolant, en cas de présence d'impureté ou de bulles d'air par exemple. Cependant nos isolants sont de haute qualité, plusieurs couches très fines sont appliquées sous pression nulle, et on peut considérer qu'ils sont exempts de défauts. Les décharges partielles ont donc principalement lieu dans l'air entre deux conducteurs. Lorsqu'il y a ionisation de l'air autour de l'isolant mais pas d'arc électrique on parle plutôt d'effet Corona, qui se produit lorsque le potentiel électrique atteint une valeur critique.

Les courts-circuits impliquent un certain nombre de spires, qui dépend principalement de l'ordre des spires dans la bobine : les spires peuvent être ordonnées ou rangées de manière aléatoire, et dans ce cas la première et la dernière spire peuvent être en contact, or c'est entre ces spires que la différence de tension est la plus grande.

Le vieillissement de l'isolant est dépendant de la température. L'échauffement entraîne l'évaporation d'une partie du matériau isolant, ce qui provoque une augmentation de porosité et donc une diminution de la résistance à la tension. Les sur-températures de courte durée n'influencent pas fortement la durée de vie de l'isolant, en revanche la température permanente de fonctionnement ne doit pas être supérieure à la valeur admissible la plus élevée. A titre indicatif, si la température de fonctionnement est supérieure à la température permanente admissible la plus élevée, la durée de vie peut être réduite de moitié ([Wil00]). Dans nos applications les isolants utilisés sont de classe *H* ou supérieure, donc la température maximale autorisée est au moins de  $180^{\circ}\text{C}$ . En régime nominal, la température maximale n'est pas atteinte, mais elle peut l'être en cas de court-circuit.

### 5.1.1.2 Modélisation des courts-circuits entre spires

Suite à l'état de l'art réalisé dans la partie 4.1.4.1 et conformément au choix de méthode à base de modèle, nous choisissons de construire un modèle analytique de court-circuit. Ce modèle est représenté sur la figure 5.1. La dégradation de l'isolant est représentée comme une résistance variable entre deux points de l'enroulement, comme vu dans [Kho09], [Vas11] et [Tri11].

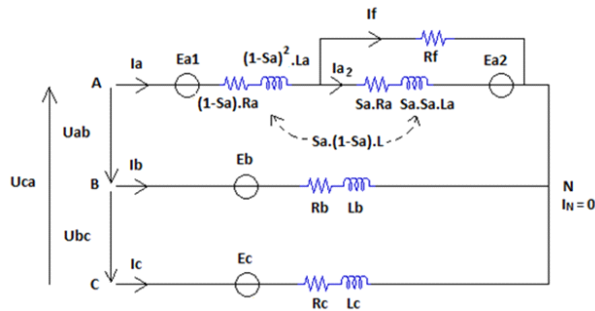


FIGURE 5.1 – Modèle de court-circuit entre spires de la phase A

Deux paramètres de faute représentent la sévérité du court-circuit.  $R_f$  représente la résistance de l'isolant au niveau du point de court-circuit, qui varie entre quelques centaines d'Ohm typique-

ment pour un isolant en bonne santé, et zéro pour un court-circuit direct. Le second paramètre,  $S_a$ , représente le pourcentage de spires court-circuitées dans la phase  $A$  et varie de 0 à 100%. Quelques nouvelles variables apparaissent par rapport au modèle nominal développé dans le chapitre 4. :  $E_{a1}$  et  $E_{a2}$  sont les tensions induites dans respectivement la partie saine et la partie endommagée de la bobine.  $I_f$  est le courant circulant dans la boucle de court-circuit.  $I_N = 0$  signifie qu'il n'y a pas de courant de neutre et que la somme des trois courants de phase est nulle. La mutuelle entre la partie saine et la partie court-circuitée de la bobine dépend du nombre de spires dans chacune des deux parties et est exprimée par  $M_a = S_a(1 - S_a)L_a$ .

Ce modèle représente le cas où il y a un unique point de court-circuit dans l'enroulement. Evidemment, d'autres cas pourraient être modélisés de manière similaire, par exemple avec plusieurs points  $i$  de courts-circuits et plusieurs couples de paramètres  $(R_{fi}, S_{ai})$ .

En se basant sur le modèle de la figure 5.1, l'équation représentant l'évolution du courant dans la boucle de court-circuit est :

$$I_f = \frac{I_a(S_a R_a + (S_a^2 L - M_a)j\omega)}{(R_f + S_a R_a + S_a^2 L j\omega)} + \frac{E_a S_a}{(R_f + S_a R_a + S_a^2 L j\omega)} \quad (5.1)$$

Les relations représentant l'évolution des courants de phase est :

$$U_{ab} = Z_b I_b + E_b - Z'_a I_a - (1 - S_a - Z_{ea})E_a \quad (5.2)$$

$$U_{bc} = Z_c I_c + E_c - Z_b I_b - E_b \quad (5.3)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (5.4)$$

avec  $Z_{ea} = \frac{S_a(R_f + j\omega M_a)}{(R_f + S_a R_a + S_a^2 L j\omega)}$  et  $Z'_a = (1 - S_a)R_a + j\omega(1 - S_a)^2 L - j\omega M_a + \frac{(R_f + j\omega M_a)(S_a R_a + (S_a^2 L - M_a)j\omega)}{(R_f + S_a R_a + S_a^2 L j\omega)}$

Ce modèle de court-circuit est générique, il ne dépend pas de la typologie de la machine, et il peut être adapté pour n'importe quelle machine électrique. C'est un modèle analytique qui permet de déterminer de façon analytique l'expression du résidu de court-circuit.

### 5.1.1.3 Le résidu de court-circuit

Les résidus sont construits à partir des paramètres observables. Il est demandé de ne pas rajouter de capteurs, car chaque ajout de matériel augmente le poids de l'équipement et diminue sa fiabilité. Les capteurs déjà existant pour le contrôle de la machine sont utilisés. D'après la partie 4.2.2.6, les paramètres observables du moteur sont  $\mathcal{P}_{obs}^m = \{I_a, I_b, I_c, \theta_a, \Omega_a\}$

On cherche à exprimer les observables en fonction des paramètres liés à la faute. Les tensions induites et les tensions de phase ont entre elles un déphasage de  $2\pi/3$ , on exprime  $E_b$  et  $U_{bc}$  comme  $E_b = E_a e^{j\frac{2\pi}{3}}$  et  $U_{bc} = U_{ab} e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

Les relations entre les courants s'expriment comme  $I_b = X_b I_a$  et  $I_c = X_c I_a$  où  $X_b$  et  $X_c$  sont des nombres complexes. En mode nominal ces complexes sont :  $X_b = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  et  $X_c = e^{j\frac{4\pi}{3}}$ .

De même, les tensions induites et les tensions phase-phase sont liées par  $E_a = X_e U_{ab}$ ,  $E_b = X_e U_{bc}$  et  $E_c = X_e U_{ca}$ , où  $X_e$  est un complexe.

Pour connaître l'évolution des observables en cas de court-circuit, on cherche tout d'abord la relation entre les courants de phase  $I_b$  et  $I_a$ . Pour ce faire  $I_a$  est exprimé en fonction de  $U_{ab}$  de deux manières. Premièrement, d'après l'équation 5.2 on a  $I_a = Z_2 U_{ab}$  avec

$$Z_2 = \frac{1 - (e^{j\frac{2\pi}{3}} - (1 - S_a - Z_{ea}))X_e}{Z X_b - Z'_a} \quad (5.5)$$

Deuxièmement, d'après l'équation 5.4 on a  $I_a = Z_3 U_{ab}$  avec

$$Z_3 = -\frac{(e^{j\frac{2\pi}{3}} + X_e + 2X_e e^{j2\pi/3})}{Z(1 + 2X_b)} \quad (5.6)$$

En résolvant  $Z_2 = Z_3$ , nous trouvons  $X_b$ , le ratio entre  $I_b$  et  $I_a$  :

$$X_b = \frac{(Z'_a e^{j\frac{2\pi}{3}} - Z - Z X_e + Z'_a X_e + Z X_e e^{j\frac{2\pi}{3}} + 2Z'_a X_e e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_a Z X_e - Z Z_{ea} X_e) / (2Z + Z e^{(j2\pi)/3} + 3Z X_e - 2S_a Z X_e + 2Z Z_{ea} X_e)}{}$$

La relation entre  $I_c$  et  $I_a$  est déduite de l'équation 5.4, qui entraîne  $X_c = -1 - X_b$ .

Une autre relation intéressante est celle liant le courant de la phase en court-circuit  $I_a$  au courant en mode nominal  $I_{anom}$ . En mode nominal, d'après l'équation 4.3,  $I_{anom} = Z_1 U_{ab}$  avec

$$Z_1 = \frac{1 - (e^{j\frac{2\pi}{3}} - 1)X_e}{Z(e^{j\frac{2\pi}{3}} - 1)} \quad (5.7)$$

Finalement on obtient  $I_a / I_{anom} = Z_2 / Z_1$ .

Enfin, le courant de court-circuit  $I_f$  est exprimé en fonction de  $I_a$ . L'équation (5.1) entraîne  $I_f = X_f I_a$  avec

$$X_f = \frac{(S_a R + (S_a^2 L - M_a)j\omega + S_a X_e / Z_2)}{(R_f + S_a R + S_a^2 L j\omega)} \quad (5.8)$$

Au terme de cette étude tous les courants  $I_b$ ,  $I_c$ ,  $I_f$  et  $I_a$  sont connus grâce à leur expression en fonction de  $I_{anom}$ , et ces relations sont fonction de l'intensité du court-circuit caractérisée par  $R_f$ ,  $S_a$ , et d'autres paramètres bien connus (résistances et inductances de phase). On exploite ce modèle pour l'analyse qui suit, en faisant évoluer les paramètres privés de la faute et en observant les conséquences sur les observables. L'évolution de la phase et de l'amplitude de  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_f$  par rapport à  $I_{anom}$  est montrée sur la figure 5.2.

En cas de court-circuit on voit apparaître des changements à la fois dans les amplitudes et dans les déphasages des courants. C'est représentable dans le diagramme de Fresnel comme le montre la figure 5.3. Graphiquement on remarque que la somme des aires des deux triangles formés par les courants nominaux et de faute des phases  $b$  et  $c$  (la phase  $a$  étant la référence pour la phase) est un bon candidat pour être un résidu lié au court-circuit car elle augmente avec le déphasage et l'amplitude. Cette aire est calculée comme

$$A_{sc} = |I_{bn} I_{bf} \sin(\sigma_b)| + |I_{cn} I_{cf} \sin(\sigma_c)| \quad (5.9)$$

avec  $I_n$  l'amplitude nominale du courant,  $I_f$  l'amplitude du courant en présence de faute, et  $\sigma_b$  et  $\sigma_c$  sont les déphasages ajoutés au déphasage nominal de  $2\pi/3$  par le court-circuit entre la phase  $a$  et la phase  $b$  ou  $c$ .

Le résidu peut être calculé en ligne à partir des capteurs de courant de phase. Sa valeur correspond à un certain degré de court-circuit caractérisé par les paramètres de faute  $R_f, S_a$ . Le résidu est



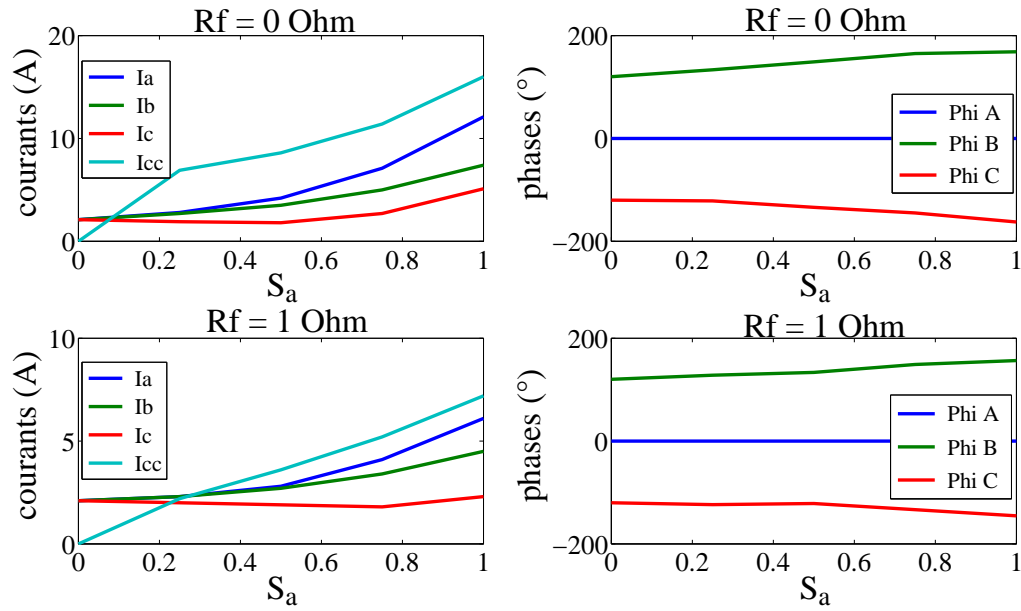


FIGURE 5.2 – Evolution de l'amplitude et de la phase des courants en fonction des paramètres de court-circuit  $R_f$  et  $S_a$  pour la MSAP 8-9.

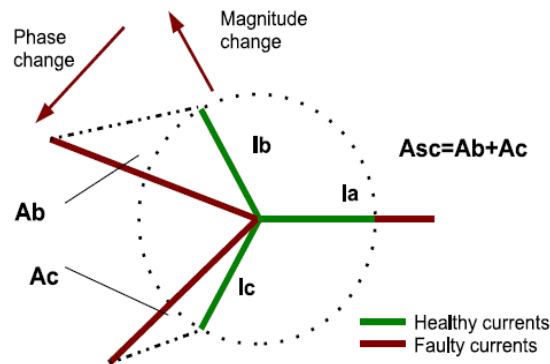


FIGURE 5.3 – Le diagramme de Fresnel montre le déphasage et le changement d'amplitude des courants de phase en cas de court-circuit, et permet le calcul du résidu  $A_{sc}$

théoriquement nul en mode nominal car les phases des courants  $I_b$  et  $I_c$  par rapport à  $I_a$  sont respectivement  $+120$  et  $-120$ . Il augmente avec le changement d'amplitude et le déphasage des courants c'est à dire avec le court-circuit.

L'une de nos contributions est de baser l'indicateur sur une étude analytique approfondie plutôt que sur de la simulation ou de l'expérimentation seules. Cela permet à la fois un raisonnement scientifique sur la compréhension du mode de défaillance et une généralisation de la méthode à toute MSAP.

### 5.1.1.4 Mise en forme du modèle de faute pour les besoins du Health-monitoring

Les paramètres  $R_f$  et  $S_a$  représentent deux caractéristiques différentes du court-circuit. Dans les faits, un point de court-circuit apparaît (donc  $S_a$  est fixé) et, au niveau de ce point, la résistance de court-circuit diminue, jusqu'au court-circuit direct où  $R_f = 0\Omega$ .

Choisissons un paramètre privé pour représenter la faute. On pourrait intégrer autant de couples  $(R_f^i, S_a^i)$  qu'il y a de spires, pour représenter tous les points possibles de court-circuit. La valeur de  $R_f^i$  serait fixée très haute en mode nominal, et diminuerait progressivement en cas de court-circuit. Cependant, cela présente plusieurs inconvénients :

- le modèle ainsi enrichi est alourdi de nombreux paramètres rarement utiles ;
- aucun de ces paramètres n'est effectivement mesurable ou estimable sur le moteur ;
- la connaissance fine des valeurs de ces paramètres n'est de toute façon pas nécessaire. Ce qu'il importe de connaître est la présence et la gravité du court-circuit, et ce peut être de manière plus globale que via ces couples de paramètres.

Il était important d'utiliser les couples de paramètres  $(R_f, S_a)$  pour développer un prototype virtuel et simuler la faute de la manière la plus précise possible, et pour construire un résidu analytique basé sur la physique de la faute. Cependant pour évaluer l'endommagement nous utilisons un paramètre plus facilement accessible. Une option est de choisir un paramètre privé que nous utilisons déjà dans le modèle nominal construit en 4.2.2. Nous avons pu remarquer qu'un court-circuit sur la phase  $a$  impacte directement la valeur de sa résistance  $R_a$ . Nous choisissons donc de représenter l'endommagement lié aux courts-circuits entre spires par une variation du paramètre privé  $R_a$ . Le modèle sera ainsi toujours aussi simple à implémenter même en cas de faute, et la valeur de ce paramètre est mesurable aisément sans démontage du moteur, avec un simple ohmmètre. L'endommagement lié au court-circuit sur la phase  $a$  est donc :

$$e^s(t) = d(R_{a0}, v(R_a, t)) \quad (5.10)$$

De la même manière on définit un endommagement sur les deux autres phases  $b$  et  $c$ .

L'endommagement est exprimé en fonction des deux paramètres  $R_f$  et  $S_a$  en calculant la résistance équivalente de la phase  $A$  avec la boucle de court-circuit et sa résistance en parallèle :

$$R_a = R_{a0}(1 - S_a) + \frac{R_{a0}S_aR_f}{R_{a0}S_a + R_f} \quad (5.11)$$

La courbe 5.4 montre l'évolution de l'endommagement en fonction du paramètre  $R_f$  si  $S_a$  est fixé à 50% pour une simulation de court-circuit sur une MSAP 8-9. L'endommagement est maximal en cas de court-circuit franc.

**Perte de performance et fin de vie utile** On définit une perte de performance  $def$  pour chacun des paramètres de sortie des composants. Les paramètres de sortie étant des signaux, le calcul de leur perte de performance prend en compte l'amplitude, la fréquence, la phase de ces signaux. Par exemple la perte de performance de la fonction  $Fu^{stator}$  définie dans la partie 4.2.2.5 est :

$$def(Fu^s, t) = \sum_{x=a,b,c} \left( \frac{||I_{x,opt}| - |v(I_x, t)||}{I_{x,opt}} + \frac{|(\Phi(I_{x,opt}) - \Phi(v(I_x, t)))|}{\Phi(I_{x,opt})} + \frac{|f(I_{x,opt}) - (f(v(I_x, t)))|}{f(I_{x,opt})} \right) \quad (5.12)$$

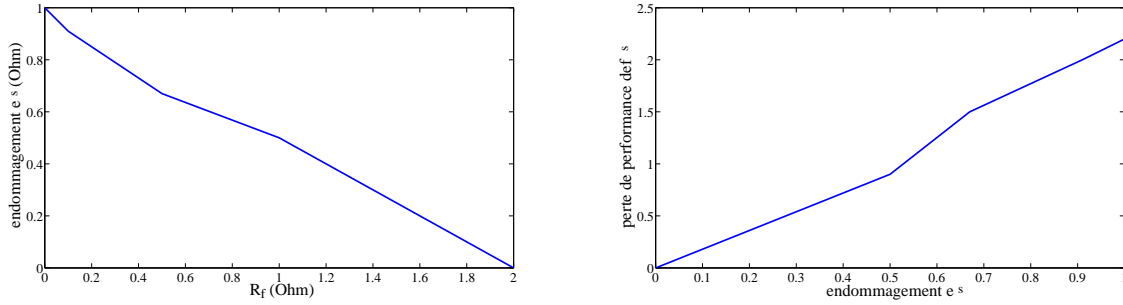


FIGURE 5.4 – Evolution de l'endommagement en fonction de la valeur de la résistance de court-circuit (à gauche) et de la perte de performance en fonction de la valeur de l'endommagement (à droite) pour une MSAP 8-9 avec un court-circuit de 50% de spires simulé.

La figure 5.4 illustre l'augmentation de la perte de performance du stator avec l'augmentation de l'endommagement statorique. Par exemple avec un endommagement de (50%,  $0.25\Omega$ ) pour le moteur 8-9, on a  $v(I_a, t) = 4A$ ,  $v(I_b, t) = 3.1A$ ,  $v(I_c, t) = 2.4A$ , alors que les courants nominaux sont de 2.2A. Pour les déphasages, au lieu de  $+/- 120^\circ$  on a  $\Phi(v(I_b, t)) = 144^\circ$  et  $\Phi(v(I_c, t)) = -128^\circ$ , d'où la perte de performance  $def(Fu^s, t) = 1.72$ .

Deux seuils d'endommagement sont définis, un premier seuil  $e_d^s$  où la phase est légèrement court-circuitée, et un second seuil  $e_p^s$  où la phase est tellement court-circuitée que la machine synchrone est en fin de vie utile. En pratique, le premier seuil passé correspondra à la valeur d'endommagement pour laquelle la dégradation est détectable, par exemple grâce à l'indicateur. La courbe 5.5 montre la valeur de l'indicateur de court-circuit en fonction de l'endommagement.

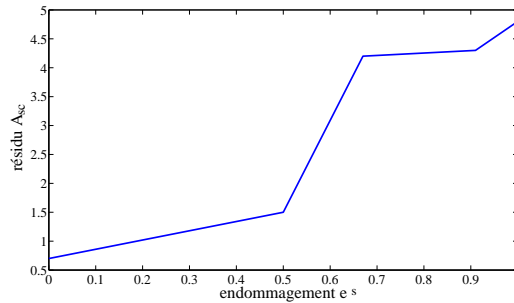


FIGURE 5.5 – Valeur du résidu de court-circuit  $A_{sc}$  en fonction de l'endommagement  $e^s$  causé par un court-circuit simulé sur la MSAP 8-9, avec  $S_a = 50\%$ .

Le stator est en fin de vie utile lorsque le système de courants qu'il fournit est trop déséquilibré, avec le passage du seuil  $e_p^s$ . Alors la machine synchrone est elle aussi en fin de vie utile d'après l'arbre des fonctions présenté dans la partie 4.2.2.5.

### 5.1.1.5 Vieillesse du stator et progression des courts-circuits inter-spires

L'échauffement d'un conducteur est  $ech(t) = \frac{kC(t)}{s^2}$  en degrés Kelvin. Dans cette équation  $k$  est un coefficient dépendant du matériau (par exemple, sa valeur est 0.006 pour le cuivre) et  $s$  est la section du cuivre en  $mm^2$ . La contrainte thermique dans le conducteur,  $C$ , est exprimée en

$A^2s$ , et s'obtient comme  $C(t) = \int_0^t I^2 dt$ . Une multiplication par 5 du courant, comme ça peut être le cas dans la boucle de court-circuit, entraîne donc une multiplication par  $5^2$  soit par 25 de l'échauffement au niveau du cuivre. On risque donc rapidement de dépasser le seuil maximal de température pour l'isolant. Nous avons vu dans la partie 5.1.1.1 que la dégradation de l'isolant menant au court-circuit entre spires est un vieillissement de type électrique et thermique. Les facteurs d'endommagement sont l'amplitude  $V$  et la fréquence  $f$  de la tension d'alimentation, ainsi que la température du stator  $T_s$ . L'ensemble des facteurs d'endommagement du stator est  $\mathcal{DF}^s = \{V, f, T_s\}$ , avec  $\mathcal{DF}_{obs}^s = \{V, f\}$ .

Il n'y a pas d'influence du court-circuit sur la fréquence  $f$  et l'amplitude  $V$  de la tension d'alimentation puisque ces facteurs dépendent uniquement de l'alimentation. On est en boucle ouverte et on ne tient pas compte du fait que le court-circuit et la perte de performance induite peuvent entraîner une augmentation de l'amplitude des tensions d'alimentation via la boucle de contrôle commande. En revanche, il y a une augmentation de la température statorique  $T_s$  en cas de court-circuit à cause des courants importants qui circulent dans les phases et dans la boucle de court-circuit.

Pour appréhender la progression des courts-circuits entre spires, nous pensons qu'il est intéressant de tenir compte de tous les phénomènes impliqués, et notamment de la dépendance réciproque des résistances et de la température statorique. La valeur de la température statorique peut être obtenue à partir de la connaissance de la puissance thermique statorique à dissiper, dont la valeur dépend des résistances de phases  $R$  mais surtout de l'intensité du court-circuit via  $R_f$ . Or  $R_f$  dépend de la température statorique  $T_s$  via la loi de vieillissement, et les résistances de phase  $R$  dépendent de  $T_s$  via la résistivité du cuivre. Ces phénomènes couplés sont représentés sur la figure 5.6.

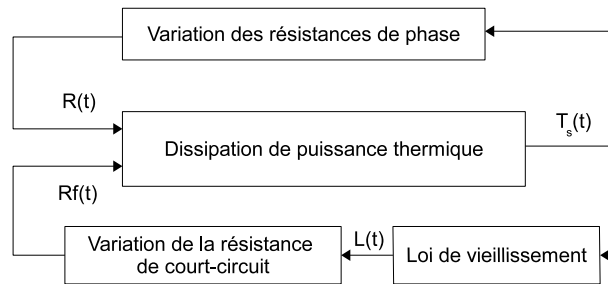


FIGURE 5.6 – Scéma bloc des relations entre la température statorique et les résistances du stator

Nous proposons les lois des différents blocs de cette figure en considérant les hypothèses suivantes :

- la température ambiante est constante, c'est à dire que le moteur est suffisamment ventilé pendant son fonctionnement ;
- la carcasse du moteur se comporte comme un radiateur ayant une résistance thermique constante  $R_{th2}$ , et a une température uniforme ;
- l'isolant d'encoche se comporte comme une résistance thermique constante de valeur  $R_{th1}$  ;
- la température de la bobine est constante ;
- on ne s'intéresse qu'au régime permanent, en considérant que le régime transitoire des variations de températures est court.

**Loi de vieillissement** Ne disposant pas de résultats d'essais ou de retour d'expérience assez précis pour estimer la loi de vieillissement du stator, nous utilisons ici pour illustrer nos propos

une loi de vieillissement obtenue dans [LFMM11] grâce à des batteries de tests sur des plaques d'isolant. Nous considérons que la forme de la loi de vieillissement s'applique à la MSAP, et nous recalons les nombreux paramètres de la loi pour avoir des durées de vie réalistes par rapport à l'expérience.

Soit  $L$  la durée de vie calculée à l'instant où les facteurs d'endommagement commencent à être appliqués à l'isolant. D'après les résultats de [LFMM11] la loi de vieillissement est de la forme :

$$L = L_0 e^{-df^s} \quad (5.13)$$

où le facteur d'endommagement global est fonction des trois facteurs d'endommagement :

$$\begin{aligned} df^s = & 0.53 \log(V) + 0.19 \log(f) + 0.54 e^{-bT} + 0.03 \log(V) \log(f) - 0.12 \log(V) e^{-bT} \\ & + 0.03 \log(f) e^{-bT} + 0.05 \log(V) \log(f) e^{-bT} \end{aligned} \quad (5.14)$$

On remarque que les coefficients permettent de quantifier l'impact de chacun des stress individuellement, mais aussi de leurs interactions.

**Variation de la résistance de court-circuit** La loi de vieillissement n'exprime pas l'évolution de l'endommagement au cours du temps, mais la durée de vie en fonction des facteurs d'endommagement. Nous souhaitons en déduire la valeur de la résistance de court-circuit  $R_f$ , pour ce faire nous choisissons d'introduire les points de vie  $PV$  du stator. Le nombre de points de vie initial  $PV_0$  correspond à la durée de vie initiale  $L_0$ , et entre  $t$  et  $t + dt$  la proportion de points de vie consommée est  $PV(t) - PV(t + dt) = \frac{dt}{L(t)}$ , d'où

$$PV(t) = \int_0^t \frac{1}{L(z)} . dz \quad (5.15)$$

La loi de vieillissement n'étant pas simple à intégrer, cette intégration peut se faire par approximation à l'aide d'une fonction constante par morceaux ayant la valeur  $L(T(t_{k+1}))$  entre les instants  $t_k$  et  $t_{k+1}$  (méthode des rectangles).

$$\begin{cases} PV(0) & = 0 \\ PV(t_{k+1}) & = PV(t_k) + \frac{(t_{k+1}-t_k)}{L(T(t_{k+1}))} \end{cases} \quad (5.16)$$

La loi donnant l'évolution du court-circuit en fonction du nombre de points de vie consommés n'existe pas à notre connaissance. Nous choisissons une loi exponentielle car nous pensons que la vitesse de la dégradation s'accélère dans le temps :

$$R_f(t) = R_{f0} \left( 1 - \exp\left(-k \frac{PV(t) - PV_0}{PV_0}\right) \right); \quad (5.17)$$

**Variation des résistances de phase** A la température  $T$  la résistance  $R$  d'une bobine est  $R(T) = (\rho(T) \times L)/s$ , où  $l$  est la longueur du fil constituant la bobine et  $s$  est sa section. Soit  $T_0$  la température nominale de fonctionnement,  $R_0 = Ra(T_0)$ .

La variation de température de  $T_0$  à  $T$  provoque un changement de la valeur de la résistance

$$R(T) = R(T_0) + \frac{l}{s} \times (\rho(T) - \rho(20)) \quad (5.18)$$

où la résistivité du cuivre est  $\rho(T) = 17.24 \times (1 + 4.2 \times 10^{-3} \times (T - 20)) \times 10^{-6}$ .

**Dissipation de puissance thermique** La puissance  $P_d$  dissipée par un court circuit entre les spires est :

$$\begin{cases} P_d &= \frac{(T_s - T_c)}{R_{th1}} \\ P_d &= \frac{(T_c - T_a)}{R_{th2}} \end{cases}$$

où  $T_s, T_c$  et  $T_a$  sont respectivement les températures du stator, de la carcasse du moteur, et ambiante. Ce système d'équation représente l'égalité de la puissance dissipée par la carcasse dans l'air ambiant et celle qu'elle absorbe à partir des spires en court-circuit. On en déduit l'expression de la fonction représentant la diffusion de la chaleur produite dans les spires :

$$T_s = (R_{th1} + R_{th2}) \times P_d + T_a \quad (5.19)$$

Une manière de calculer  $P_d$  en fonction de  $R_f$  et  $S_a$  est proposée en annexe 4.

**Perspectives : essais de vieillissement** Des essais sont en cours sur 10 stators de MSAP 10-12. Les tensions d'apparition des décharges partielles sont déterminées. Puis les moteurs sont alimentés à différentes amplitudes de tensions, dans une enceinte à température variable, pour un nombre de cycles correspondant à une vie complète (avec une fréquence raisonnablement accélérée), ou jusqu'au claquage. Pendant les essais, des contrôles intermédiaires de caractérisation de l'état de l'isolant sont réalisés :

- mesures d'impédance ;
- mesures des décharges partielles :
  - seuil d'apparition des décharges partielles ;
  - nombre de décharges partielles par minute ;
  - amplitude des décharges partielles.

La fréquence de ces contrôles dépend de la durée de vie escomptée et est propre à chaque test. Le but de ces essais est de construire une loi de vieillissement de l'isolant dépendant de l'amplitude de la tension d'entrée et de la température.

#### 5.1.1.6 Détection et identification des courts-circuits entre spires : simulations et expérimentations

Un prototype virtuel de MSAP en présence de court-circuit est construit sous Matlab Simulink, les simulations montrent que le résidu de court-circuit augmente progressivement avec l'intensité du court-circuit. Ceci est également montré expérimentalement avec des essais sur des MSAP 8-9 et des MSAP 10-12 court-circuitées.

**Résultats de simulation** La partie électrique du modèle dynamique de la machine en court-circuit est réalisée comme le montre la figure 5.1 grâce à la librairie Simpower ([Mat13]), qui permet l'association de composants électriques tels que des inductances, des résistances, et des sources de tension. Elle est ensuite intégrée au modèle dynamique nominal de la MSAP. Cela permet de créer un prototype virtuel, dont nous nous servons pour valider les algorithmes de diagnostic et pronostic.

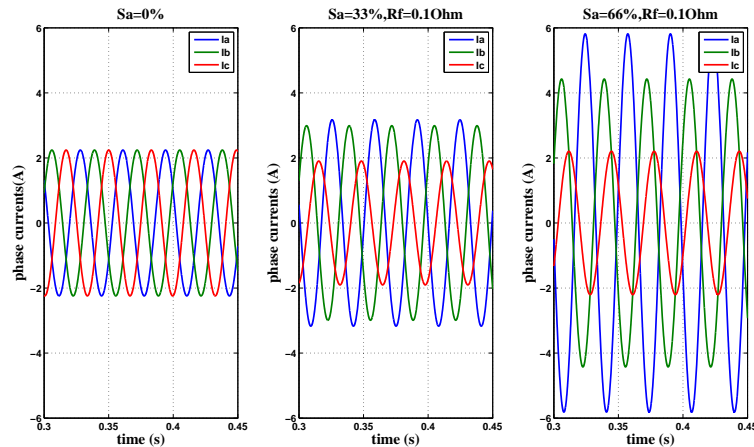


FIGURE 5.7 – Simulation temporelle des courants avec une machine en mode nominal (à gauche) et une machine dont la phase A est partiellement court-circuitée (au milieu et à droite), pour une MSAP 8-9.

Des simulations dynamiques sont réalisées pour la MSAP avec différentes intensités de court-circuit. La figure 5.7 montre l'évolution temporelle des trois courants de phase en présence d'un court-circuit. D'autres simulations sont réalisées pour plusieurs intensités de court-circuit et le résidu est calculé à chaque simulation. Les résultats sont présentés sur la figure 5.8. On voit l'évolution du résidu  $A_{sc}$  en fonction du nombre de spires court-circuitées pour différentes valeurs de résistance de court-circuit. La courbe avec  $R_f = 0$  représente un court-circuit franc, c'est le pire cas de figure. On voit que le résidu augmente avec le nombre de spires en court-circuit, et ce de manière progressive. Par ailleurs, plus la résistance de court-circuit diminue, plus le résidu augmente.

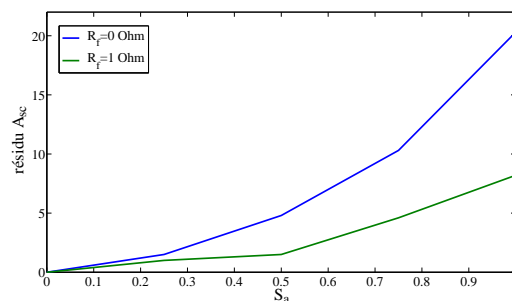


FIGURE 5.8 – Evolution du résidu de court-circuit  $A_{sc}$  pour plusieurs valeurs de  $S_a$  et  $R_f$ . Simulation de la machine 8-9.

**Résultats expérimentaux** Des tests sont réalisés sur les deux types de MSAP. L'objectif est de comparer les résultats de simulation et d'essais pour valider le modèle de faute et justifier le choix du résidu. L'établi de manipulation de la salle d'essai est présenté en annexe 7.

**MSAP 8-9** Plusieurs machines rebutées à cause de courts-circuits nous permettent une première application réelle. Pour ces moteurs, il est impossible de caractériser le court-circuit car les carters sont fermés, et les spires sont bobinées de manière aléatoire et compacte. On ne connaît pas le nombre de spires court-circuitées  $S_a$  ou la résistance de court-circuit  $R_f$ . Cependant les résistances de phase dépendent de ces deux paramètres d'une manière connue et sont mesurables. Les MSAP sont donc caractérisées par un indicateur de déséquilibre  $I_{unb}$  calculé à partir des mesures des résistances de phase :

$$I_{unb} = \sqrt{\sum_{i=a,b,c} (R_i - R_{inom})^2} \quad (5.20)$$

L'indicateur de déséquilibre  $I_{unb}$  est calculé pour les différents points de simulation grâce à la résistance équivalente de la phase court-circuitée (voir l'équation 5.11).

Il y a donc une correspondance entre le facteur de déséquilibre  $I_{unb}$  mesuré lors des essais, et les deux facteurs de gravité du court-circuit  $S_a$  et  $R_f$  dont dépend le facteur de déséquilibre calculé pour les simulations. Pour chaque  $I_{unb}$ , plusieurs couples  $(S_a, R_f)$  sont possibles.  $I_{unb}$  est donc un indicateur global du déséquilibre entre phases mais il ne renseigne pas précisément sur le nombre de spires en court-circuit et sur la résistance du court-circuit.

La procédure d'essai est comme suit. L'indicateur de déséquilibre est calculé. La MSAP est alimentée avec  $V_d = 0V$  et  $V_q = 21V$ . Les essais sont réalisés à vide. Il n'y a pas de boucle de contrôle de la vitesse. L'essai continue jusqu'à avoir atteint le régime permanent de vitesse, soit quelques secondes. Les courants de phase et la position électrique du rotor sont enregistrés. Après l'essai, l'indicateur de déséquilibre est à nouveau calculé pour détecter une aggravation du court-circuit le cas échéant (à noter que cela n'est jamais arrivé avec des essais aussi courts).

L'essai ainsi décrit pourrait être réalisé comme test en ligne, par exemple avec l'avion au sol en phase de pré-vol. Une adaptation serait nécessaire si le moteur devait être testé en boucle fermée (avec la boucle de commande).

Les signaux sont ensuite filtrés, et la valeur du résidu de court-circuit est calculée. La figure 5.9 montre l'évolution temporelle des courants de phase durant un essai.

Les simulations sont réalisées dans les mêmes conditions que les essais. Les valeurs du résidu de court-circuit en fonction de l'indicateur de déséquilibre en essai et en simulation sont présentées sur la figure 5.10. Chaque point représente un essai sur une machine différente ayant un déséquilibre connu.

Il y a deux courbes correspondant aux simulations. En effet  $I_{unb}$  dépend de  $R_f$  et  $S_a$ . On décide de fixer  $R_f$  constant dans les simulations, fixé à 0 ou 10 $\Omega$ , et d'augmenter  $I_{unb}$  en augmentant  $S_a$ . Ces deux valeurs sont choisies pour  $R_f$  car 1 $\Omega$  est un court-circuit très léger avec de faibles conséquences et au contraire  $R_f = 0\Omega$  est le pire cas de figure avec un court-circuit direct. Ainsi nous considérons que les deux courbes forment une enveloppe encadrant tous les cas intéressants de court-circuit entre spires.



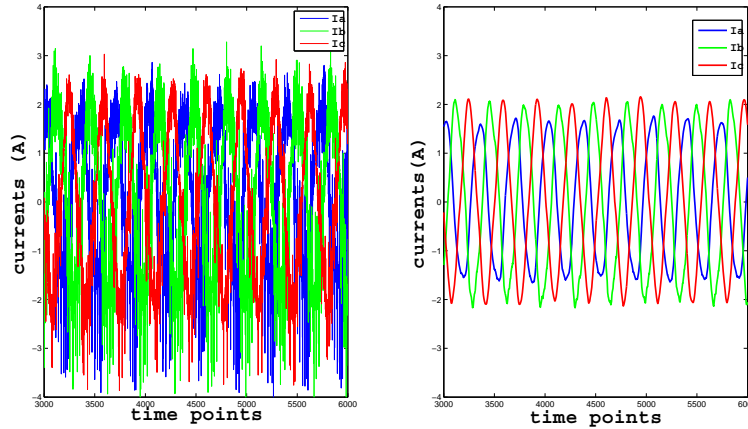


FIGURE 5.9 – Résultats d'essai pour une MSAP court-circuitée ( $I_{unb} = 0.3\Omega$ ). Sortie des capteurs de courants à gauche et signaux débruités à droite. La tension entre phases est 22V, la vitesse mécanique est 450 tours/minute, et la fréquence d'acquisition des signaux est 10kHz.

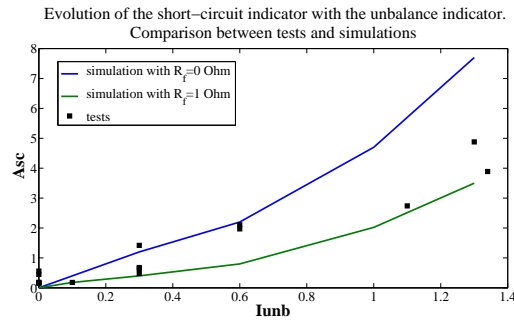


FIGURE 5.10 – Variation du résidu de court-circuit  $A_{sc}$  en fonction de l'indicateur de déséquilibre  $I_{unb}$ . Comparaison entre tests et essais pour les MSAP de type 8-9.

La tendance est proche entre simulations et essais. Pratiquement tous les points d'essai sont situés dans l'enveloppe entre  $R_f = 0\Omega$  et  $R_f = 1\Omega$ . Les simulations sont légèrement pessimistes par rapport aux essais, certains points correspondant à  $R_f > 1\Omega$ . Dans le cadre de la détection et du diagnostic cela peut donner une détection plus en avance ou un diagnostic un peu pessimiste par rapport à la réalité, ce qui est souvent mieux qu'une détection tardive ou un diagnostic trop optimiste. Si l'on souhaite s'affranchir de cette différence il est aussi possible de recalibrer le modèle par identification de certains paramètres de manière à le rendre moins pessimiste.

**MSAP 10-12** Pour ces essais, une machine est bobinée de manière à avoir accès à certaines spires, à chaque 25% de bobine élémentaire (voir la figure 5.11). Cela permet de créer un court-circuit à l'extérieur de la MSAP en connectant les spires sortantes à travers une résistance dont la valeur est maîtrisée. Contrairement aux essais sur les MSAP 8-9, nous avons ici la possibilité d'imposer précisément et indépendamment les valeurs de  $R_f$  et  $S_a$ .

Après rebobinage de la MSAP, les inductances et les résistances des bobinages sont caractérisées, et le modèle dynamique utilisé pour la comparaison est recalibré pour que les valeurs des paramètres

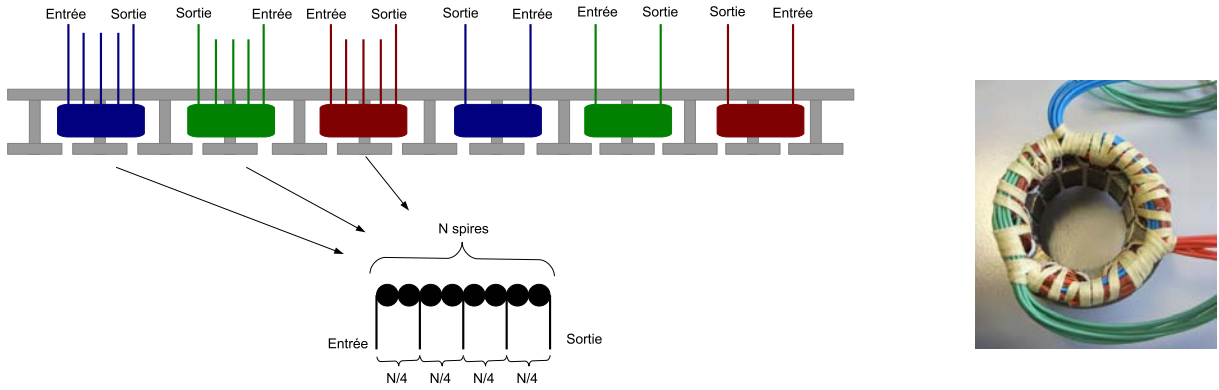


FIGURE 5.11 – Bobinage du stator de la machine 10-12 sur laquelle est réalisée les essais de courts-circuits.

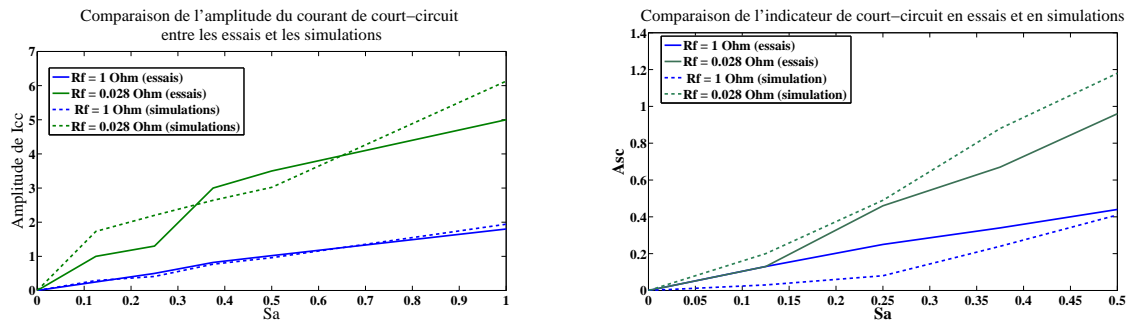


FIGURE 5.12 – Amplitude du courant de court-circuit  $|I_{cc}|$  et de l'indicateur de court-circuit  $A_{sc}$  en fonction de  $S_a$  pour les machines 10-12. Comparaison entre les résultats de test et de simulation.

correspondent. Pour les essais, le court-circuit est réalisé sur un boîtier de connection avec deux résistances de court-circuit différentes :  $1\Omega$  (court-circuit léger) et  $0.028\Omega$  (court-circuit quasiment direct, correspondant à la résistance du fil électrique dont nous nous sommes servis pour relier les spires en court-circuit). Le court-circuit direct n'est pas réalisé pour ne pas endommager le moteur. La tension d'alimentation est  $V_d = 0V$  et  $V_q = 2.8V$ . Les essais durent quelques secondes, durant lesquelles les températures et les courants sont mesurés.

La méthode permet cette fois la mesure des courants de court-circuit, ce qui n'était pas possible avec les MSAP 8-9 où les courts-circuits n'étaient pas maîtrisés. Les amplitudes des courants de court-circuit obtenus en essais et en simulation sont comparées sur la figure 5.12. On voit que les résultats d'essai et de simulation sont similaires, ce qui renforce notre confiance dans le modèle.

Les valeurs de  $A_{sc}$  obtenues en essais et en simulations sont comparées pour les deux valeurs de résistance (voir figure 5.12). Là encore les résultats simulés englobent bien les résultats d'essai.

### 5.1.1.7 Conclusion

Dans cette partie, la surveillance des courts-circuits entre spires a été abordée.

Les courts-circuits entre spires d'une même phase ont été étudiés et modélisés. Le modèle ana-

lytique est générique, et peut être adapté pour toute machine électrique. Il a permis d'exprimer analytiquement un résidu de court-circuit, basé sur les courants de phases, observables. Le fait que le résidu soit basé sur des équations issues de la physique plutôt que sur de la simulation ou de l'expérimentation seulement permet à la fois un raisonnement scientifique sur la compréhension du mode de défaillance et une généralisation de la méthode quelle que soit la typologie de MSAP considérée. La performance des fonctions de la MSAP peut être estimée en présence de court-circuit. L'endommagement lié au court-circuit est modélisé par un paramètre privé du modèle du stator, la résistance de phase. L'évolution du court-circuit dépend des facteurs d'endommagement, la tension d'alimentation (amplitude et fréquence) et la température statorique. Ne disposant pas de données sur le vieillissement des MSAP, nous adaptons une loi de vieillissement obtenue dans [LFMM11], dépendant des facteurs d'endommagement sélectionnés. L'influence respective de la température statorique et de la présence du court-circuit permet d'illustrer la fonction de rétroaction présentée en 2.2.3. La MSAP en présence de court-circuit est ainsi modélisée conformément au cadre formel présenté dans le chapitre 2.

Les simulations que nous avons réalisées sur notre prototype virtuel ont montré l'évolution progressive du résidu de court-circuit en fonction de l'intensité du court-circuit. Les résultats d'essais que nous avons réalisés sur des MSAP 8-9 et 10-12 ont corroboré nos résultats de simulation. Nous avons pu voir qu'il était possible de mesurer la valeur du résidu en ligne, de détecter la présence de court-circuit statorique dans le bobinage, et d'attester de son état d'avancement.

La vérification de la présence d'un court-circuit pourrait être réalisé comme test en ligne, par exemple avec l'avion au sol en phase de pré-vol. Les résultats sur les valeurs d'indicateurs de court-circuit ont été obtenus en boucle ouverte, donc une adaptation serait nécessaire si le moteur devait être testé en boucle fermée (avec la boucle de commande). L'effet de la température sur la valeur du résidu pourrait aussi être étudiée, car le test en pré-vol n'est pas forcément toujours réalisé à la même température.

Il serait possible de modéliser exactement de la même manière plusieurs points de court-circuit entre spires. Nous pourrions également appliquer une méthode similaire à d'autres types de courts-circuits. Le modèle serait quasiment le même pour un court-circuit entre phases, avec une résistance de court-circuit située entre deux points de deux phases différentes (avec un pourcentage de spires court-circuitées pour chaque phase). Pour modéliser un court-circuit entre une phase et le châssis, le modèle doit être modifié pour faire apparaître une fuite de courant vers la masse, toujours via une résistance de court-circuit.

Nous avons parlé des nos projets d'essais de vie accélérés, qui devraient permettre de mieux comprendre l'évolution des courts-circuits.

### 5.1.2 La désaimantation partielle du rotor

Le rotor reçoit de nombreux stress durant la vie opérationnelle de la MSAP, l'AMDEC (tableau 4.1) nous a montré que la désaimantation partielle du rotor fait partie des fautes critiques à surveiller. Dans cette partie la désaimantation partielle du rotor est tout d'abord caractérisée, afin d'analyser son mécanisme et ses conséquences. Un modèle analytique de désaimantation est construit à partir du modèle nominal développé dans le chapitre 4. Ce modèle, générique et simplifié, est validé par un modèle à éléments finis très précis mais peu rapide. Finalement, cela nous permet de construire un résidu dédié à la désaimantation partielle du rotor, basé sur une

analyse fréquentielle des courants de phase observables. La progression de la désaimantation est étudiée et modélisée. Le modèle peut alors être mis en forme dans le cadre générique formel de modélisation. Cela nous amène à la détection et l'identification de la désaimantation partielle du rotor grâce au résidu, tout d'abord sur notre prototype virtuel de MSAP, puis en essais.

### 5.1.2.1 Caractérisation de la désaimantation d'un aimant du rotor

Un aimant permanent est caractérisé par un cycle d'hystérésis dans le plan  $(B, H)$ . Le mécanisme de désaimantation d'un aimant est bien présenté dans [Bug04] et [Far08]. Pour résumer, un champ magnétique extérieur s'opposant à la polarisation rémanente de l'aimant (induction magnétique existant dans le matériau en l'absence de courant) a une influence sur le flux créé par celui-ci. Si le champ inverse subit par l'aimant est supérieur au champ limite de réversibilité, le point de fonctionnement ne retournera pas sur la caractéristiques initiale dans le plan  $(B, H)$  mais sur une droite de recul située en-dessous. Cela signifie que le niveau d'induction rémanente de l'aimant diminue irréversiblement, c'est-à-dire que l'aimant est démagnétisé.

Lors de courts-circuits, le déséquilibre entre les courants de phases induit un champ pulsant en plus du champ tournant habituel. Ce champ pulsant peut être antagoniste au champ des aimants, et ainsi augmenter les risques de désaimantation. De même, si la température augmente au-delà de la température de Curie du matériau de l'aimant (typiquement, de l'ordre de  $700^\circ C$  pour du Samarium-Cobalt), les valeurs de l'induction rémanente et du champ coercitif évoluent, et l'effet se matérialise par une perte de flux.

Un aimant peut également être fissuré voire brisé par l'effet centrifuge, à cause des vibrations du rotor, ou à cause d'un défaut de manufacture. Certains auteurs, dont [CFRS09], considèrent que les fissures dans les aimants, souvent dus aux stress mécaniques, créent une perturbation similaire à une démagnétisation locale. C'est donc un phénomène qu'il est intéressant de pouvoir surveiller.

### 5.1.2.2 Modélisation de la désaimantation d'un aimant du rotor

**Modèle analytique** Notre objectif est de construire un modèle analytique simple et rapide à simuler pour construire le résidu de faute. La première chose à faire est d'analyser les effets de la démagnétisation. Lorsqu'un aimant est désaimanté, tout se passe comme s'il y avait une superposition de deux champs rotoriques : le champ nominal, et un champ fictif de signe opposé, nul partout sauf en face de l'aimant endommagé. Son amplitude dépend du niveau de désaimantation, elle appartient à l'intervalle  $[0, B_{max}]$ . Ces deux champs s'ajoutent pour former le champ rotorique.

Grâce au modèle géométrique développé et présenté dans le paragraphe 4.2.1.1, il est possible de simuler une MSAP avec un aimant  $M_f$  ( $f \in (0, \dots, m-1)$ ) produisant un flux magnétique différent de celui des autres aimants. La valeur du flux nominal étant  $B$ , l'aimant en faute  $M_f$  produit un flux magnétique d'une valeur de  $k_B B$ , avec  $k_D$  le coefficient de démagnétisation de l'aimant, compris entre 0 et 1. Le modèle du flux en cas de désaimantation est le suivant :

$$\Phi_0^k(\theta) = \Phi_0(\theta) - k_D \times \left(-1^f S_{00}\left(\theta - f \frac{2\pi}{m}\right)\right) B$$

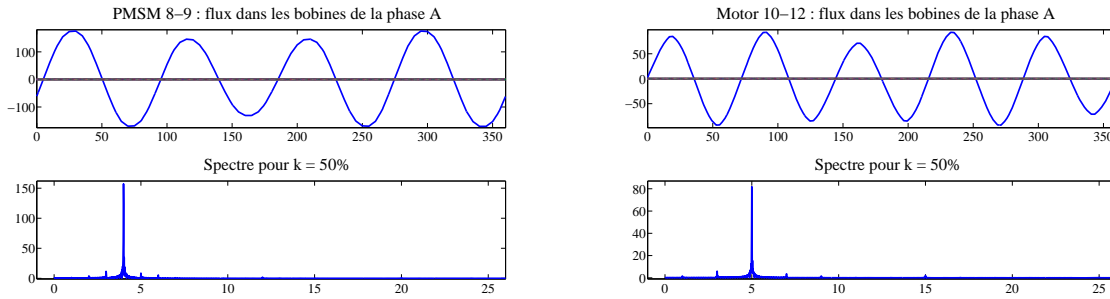


FIGURE 5.13 – Forme d'onde et flux pour les machines 8-9 et 10-12 avec un aimant désaimanté de 50%

Lorsque  $k = 0$ ,  $\Phi_0^1(\theta) = \Phi_0$ , et le rotor est en mode nominal.

Nous remarquons que le modèle de désaimantation n'est pas totalement générique, il doit être configuré suivant la typologie de la MSAP étudiée (nombre d'aimants, de bobines, dimensions, et séquence des bobines).

Le modèle géométrique est implémenté et simulé sous Matlab pour les deux types de MSAP. Le flux magnétique dans une dent avec 50% de désaimantation est représenté temporellement et spectralement sur la figures 5.13. On remarque l'apparition de nouveaux harmoniques induits par la désaimantation sur le flux par rapport à la figure 4.14. Ces nouveaux harmoniques se retrouveront dans les courants de phase qui dépendent du flux rotorique.

**Modèle à éléments finis** Pour parfaire notre connaissance sur la faute et valider le modèle géométrique simplifié, un modèle plus précis est construit. Le modèle est développé en utilisant un outil de conception, FEMM, basé sur des calculs à éléments finis. Ce modèle donne la répartition du flux magnétique en cas de désaimantation d'un ou plusieurs aimants de la machine. Il calcule également les tensions induites en fonction de la position du rotor. Les simulations sont réalisées pour des désaimantations de 0, 25, 50, 75 et 100% d'un pôle. Le pas de calcul est 1.6 degrés sur un total de 360 degrés pour un tour complet du rotor, soit 225 points calculés pour un tour. Trois tables sont alors créées sous Matlab Simulink. Leur entrée est la position électrique et le pourcentage de désaimantation, et leur sortie est l'ensemble des trois tensions induites. Entre les points calculés par FEMM, les valeurs sont interpolées linéairement.

### 5.1.2.3 Le résidu de désaimantation

La désaimantation d'un pôle se traduit par l'apparition de nouvelles fréquences dans le flux, se répercutant dans les tensions induites et les courants. C'est pourquoi les références citées dans la partie 4.1.4.1 réalisent le plus souvent une analyse fréquentielle de signaux, que ce soit les flux magnétiques, les tensions induites, ou les courants de phase. Nous adoptons une technique similaire sur les signaux observables que sont les courants de phase.

Une analyse de Fourier rapide (FFT) des courants montre l'apparition de nouveaux harmoniques

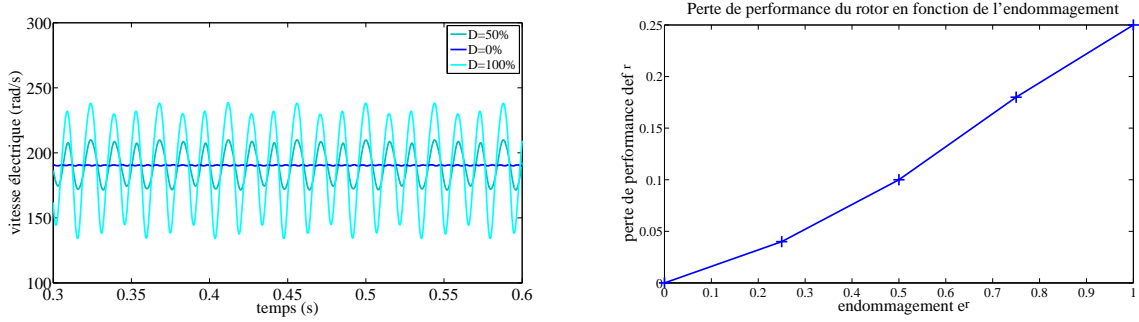


FIGURE 5.14 – Oscillation de la vitesse de l'arbre moteur (à gauche) et perte de performance  $def^{\Omega}$  de la fonction  $Fu^{\Omega}$  (à droite) causées par la désaimantation partielle du rotor sur la MSAP 8-9. Simulation.

lorsqu'un pôle est désaimanté. Les coefficients de Fourier sont calculés comme :

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi fn} \quad (5.21)$$

Les énergies des nouveaux harmoniques induits par la désaimantation sont sommés pour créer le résidu de désaimantation  $H_{dem}$ .

$$H_{dem} = \sum H(I_a, I_b, I_c) \quad (5.22)$$

où seuls les harmoniques induits par la désaimantation sont pris en compte. Leur numéro dépend de la configuration du stator et du rotor.

#### 5.1.2.4 Mise en forme du modèle de faute pour les besoins du Health-monitoring

Nous avons vu que la désaimantation se modélise bien par un paramètre  $k_D$  que nous avons appelé coefficient de démagnétisation. C'est ce paramètre qui représentera l'endommagement du rotor lié à la désaimantation. Aucun des paramètres du modèle nominal présenté dans la partie 4.2 ne pourrait jouer ce rôle donc nous rajoutons ce nouveau paramètre privé  $k_D$  au modèle initial. Alors l'endommagement est  $e^r(t) = v(k_D, t)$  car en mode nominal,  $k_D = 0$ .

**Perte de performance** En cas de désaimantation du rotor, le système de tensions induites est non équilibré. Cela entraîne des oscillations dans la vitesse électrique, comme le montre la figure 5.14.

La perte de performance de la fonction  $Fu^{rotor}$  présentée dans la partie 4.2.2.5 est :

$$def(Fu^r, t) = \frac{||\Omega_{em,opt}| - |v(\Omega_e m, t)||}{\Omega_{em,opt}} \quad (5.23)$$

La figure 5.14 montre l'évolution de la perte de performance du rotor en fonction de l'endommagement lié à la désaimantation partielle du rotor. Les oscillations de la vitesse électrique entraînent

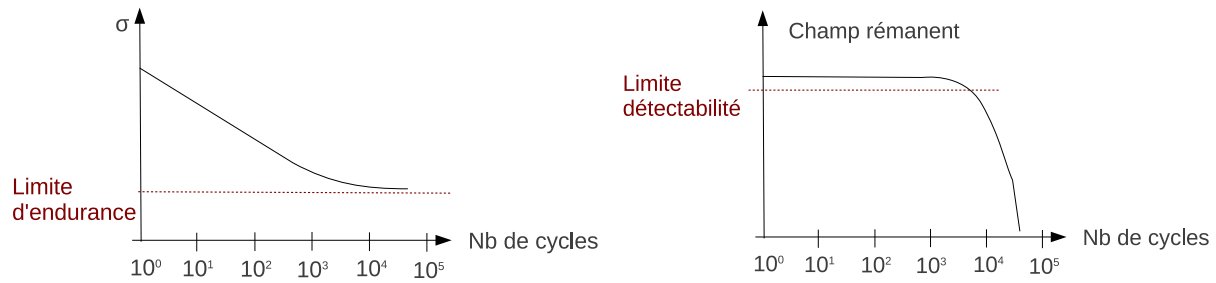


FIGURE 5.15 – La courbe de Wöhler (à gauche). Le vieillissement mécanique d'un aimant du rotor (à droite).

des oscillations dans la vitesse de l'arbre qui lui est proportionnelle (voir les équations 4.4 et 4.5). C'est la propagation de perte de performance du rotor vers l'arbre. Pour la désaimantation partielle du rotor, il y a un seuil de dégradation  $e_d^r$ . Cette faute n'entraîne pas à elle seule la panne du moteur, on n'a donc pas de seuil  $e_p^r$ .

### 5.1.2.5 Vieillessement du rotor et progression de la désaimantation

Imaginons le modèle de vieillissement suivant :

- dans une première phase, à chaque cycle d'effort la fatigue de l'aimant s'accumule car il est dimensionné pour résister à l'effort qu'il subit. Il s'agit donc d'une déformation macroscopiquement élastique ;
- le nombre maximal de cycles que peut supporter l'aimant étant atteint celui-ci se rompt en deux parties, la frette empêchant à la partie non solidaire du rotor de bouger ;
- à partir de cet état, chaque partie de l'aimant subit à nouveau un processus de vieillissement similaire à celui ayant déclenché la rupture, la loi de vieillissement étant similaire, jusqu'à se briser à nouveau.

Lors de cette évolution, la rupture brutale de l'aimant (ou de la partie considérée de l'aimant) est régie par la courbe de Wöhler décrite sur la figure 5.15, qui représente la limite d'endurance du matériau en fonction du nombre de cycles de fatigue.

On prend l'hypothèse, réaliste, que plus l'aimant est brisé plus il devient fragile, c'est à dire que sa courbe de wöhler caractéristique se rapproche de l'axe des absisses et que la pente de la partie linéaire augmente. En notant  $N_i$  la date de la  $i^{me}$  rupture, on pressent que  $\forall i, N_i - N_{i-1} > N_{i+1} - N_i$ , car la durée entre deux fissures consécutives est de plus en plus courte. En effet une rupture se produit sur une partie d'aimant déjà fatiguée par les efforts ayant conduit aux ruptures précédentes. Si nous prenons l'hypothèse que le nombre de cycles entre les ruptures  $i$  et  $i + 1$  est divisé par un facteur  $k > 1$  par rapport au nombre de cycles entre les ruptures  $i - 1$  et  $i$ , le nombre de ruptures présentes dans l'aimant croît de plus en plus rapidement pour tendre asymptotiquement vers  $\frac{k}{k-1}Nr_1$ , nombre limite (et hypothétique) de cycles pour lequel l'aimant serait réduit à l'état de poussière. Prenons enfin comme hypothèse que chaque fracture divise l'induction rémanente d'un facteur  $K_{perte} > 1$ . C'est justifié car après fracture les deux parties résultantes sont séparées par un entrefer. Nous obtenons une loi régissant l'induction rémanente en fonction du nombre de cycle d'utilisation.

Le nombre de ruptures  $n$  en fonction de l'âge de l'aimant  $t$  est :

$$n = \frac{\log(T_x) - \log(T_x + t \times (1 - T_x))}{\log(T_x)} \quad (5.24)$$

où  $T_x = \frac{N_{i+1}}{N_i}$  est le facteur d'accélération de la dégradation.

L'intensité du champ rémanent en fonction du nombre de ruptures est

$$B = B_0 \times (K_{perte})^n \quad (5.25)$$

où  $K_{perte}$  est le coefficient de perte de champ rémanent à chaque rupture.

Les résultats de simulation sont présentés sur la figure 5.15, avec pour l'application numérique le nombre de cycles jusqu'à la première rupture  $N_1 = 10000$ , le champ rémanent initial  $B_0 = 100$ ,  $T_x = 2$  et  $K_{perte} = 0.8$ .

Nous avons vu dans la partie 5.1.2.1 que les facteurs d'endommagement du rotor sont les courants de court-circuit  $I_{cc}$  et les hautes températures statoriques  $T_s$ . Nous n'avons pas à ce jour de données réelles pour intégrer ces facteurs d'endommagement à la loi de vieillissement. Ils pourraient être intégrés aux coefficient  $T_x$  (ils accélèrent la fréquence d'apparition de nouvelles fissures) ou  $N_1$  (ils accélèrent l'apparition de la première fissure). Ceci fait une perspective intéressante.

### 5.1.2.6 Détection et indentification de la désaimantation partielle du rotor : simulations et expérimentations

Le prototype virtuel de MSAP est modifié pour représenter la désaimantation partielle du rotor, les simulations montrent que le résidu de désaimantation augmente progressivement avec la désaimantation. Ceci est également montré expérimentalement avec des essais sur les MSAP 8-9 désaimantées manuellement.

**Résultats de simulation** Le même modèle dynamique que précédemment pour l'étude du court-circuit est utilisé mais les trois tensions induites, précédemment modélisées comme des fonctions sinus, sont remplacées soit par les trois tables provenant de FEMM, soit par le modèle géométrique pour simuler le comportement de la MSAP en cas de désaimantation (voir figure 5.16). Cette méthode permet de choisir la précision du modèle à élément fini ou l'approche analytique du modèle géométrique, combinées à la haute vitesse de simulation du modèle dynamique.

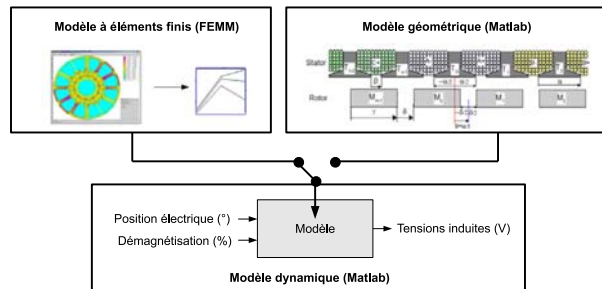


FIGURE 5.16 – Méthode de modélisation de la désaimantation



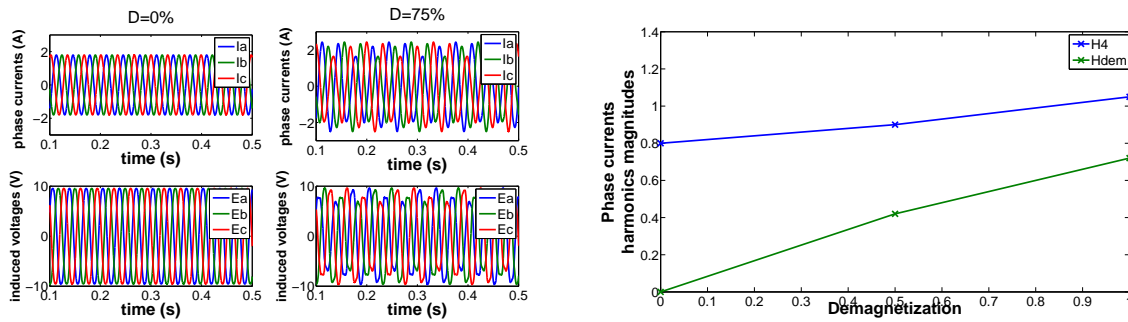


FIGURE 5.17 – Evolution temporelle des courants de phase en cas de désaimantation de l'un des aimants d'une machine 8-9 (à gauche). Evolution de l'harmonique fondamental  $H_4$  et du résidu  $H_{dem}$  lorsqu'un pôle de la machine 8 – 9 est désaimanté. (à droite). Résultats de simulation.

Le comportement de la machine est simulé avec le modèle dynamique, avec l'un des aimants désaimanté de 0 à 100%. Les résultats temporels sont présentés sur la figure 5.17, avec l'évolution du résidu  $H_{dem}$  en fonction du coefficient de désaimantation. On voit que  $H_{dem}$  augmente progressivement avec la sévérité de la faute.

**Résultats expérimentaux** Les PMSM 8-9 sont utilisées pour l'application expérimentale de la désaimantation. Pour les besoins de ces essais, un pôle doit être désaimanté. Le rotor est démonté afin de dégrader physiquement l'aimant. Deux moteurs sont utilisés. Les deux stators des moteurs sont équilibrés. Le rotor subit une ablation partielle (environ 50%) ou totale (100%) de l'un des aimants, pour représenter la désaimantation.

Deux types d'essais sont réalisés, l'un pour observer les tensions induites et l'autre pour observer les courants. Les essais sont réalisés sans charge, et en boucle ouverte.

Le principe du premier essai est le suivant. Le moteur est fixé tête-bêche avec un moteur sain comme sur la photographie 5.18), de sorte que le moteur désaimanté soit entraîné en rotation par le moteur sain. Deux des tensions entre phases du moteur testé sont enregistrées. Comme ce moteur n'est pas alimenté ces tensions correspondent aux tensions induites dans le stator par la rotation du rotor. Elles sont présentées sur la figure 5.18.

Les résultats temporels sont similaires aux résultats de simulation montrés précédemment, avec la même forme d'onde. Une analyse spectrale est réalisée pour une meilleure comparaison (voir la figure 5.19). L'harmonique fondamental (le 4) a la même amplitude pour les essais et pour FEMM. Les mêmes harmoniques apparaissent avec la désaimantation de l'aimant (1, 2, 5, 13, 14) à des amplitudes similaires. Les résultats d'essai et de modélisation coïncident.

Pour le deuxième essai, la machine avec l'aimant désaimanté à 50% est alimentée directement pour observer les courants de phase. Les tensions induites ne sont plus accessibles puisque les phases ont désormais une tension phase-neutre non nulle. Les courants sont comparés avec les simulations réalisées dans les mêmes conditions. Une analyse spectrale est réalisée, dont les résultats sont présentés sur la figure 5.20. On voit que les harmoniques apparaissant dans le courant sont les mêmes en essais et avec les simulations. Il est donc possible de détecter l'augmentation du résidu  $H_{dem}$  en mesurant les courants, et d'en déduire le pourcentage de désaimantation.

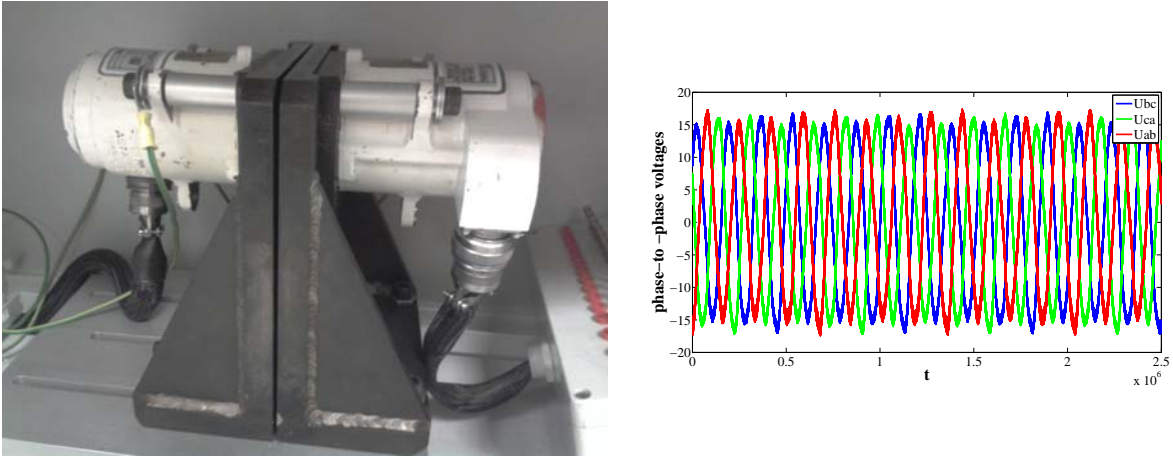


FIGURE 5.18 – Pilotage du moteur désaimanté par un moteur sain (à gauche). Tension induite obtenue en essai sur une PMSM 8-9 avec 50% de désaimantation d'un pôle (à droite).

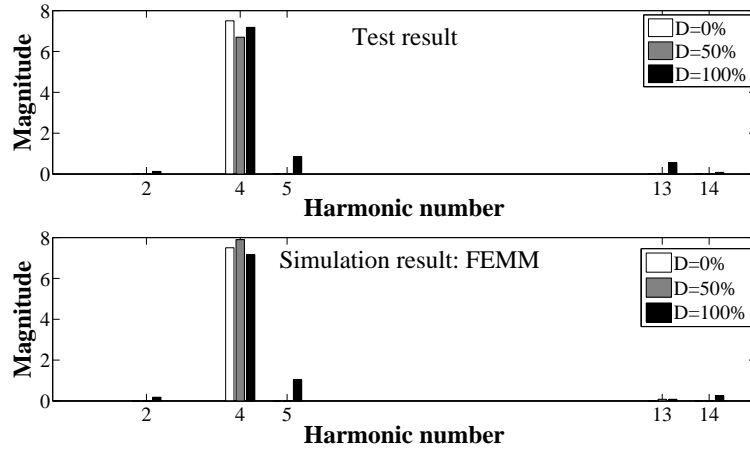


FIGURE 5.19 – Harmoniques des tensions induites. Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats d'essai avec une machine 8-9. Un aimant est désaimanté, la désaimantation varie entre 0 et 100%.

### 5.1.2.7 Conclusion

Dans cette partie, la surveillance de la désaimantation partielle du rotor a été abordée. Le mécanisme de la désaimantation partielle du rotor est décrit. Un modèle analytique simple et rapide à simuler est développé pour construire le résidu de faute. Un modèle à éléments finis, plus précis mais plus long à simuler, valide le comportement du modèle analytique. Un résidu dédié à la désaimantation partielle du rotor est construit à partir d'une analyse fréquentielle des courants de phase. Le modèle de désaimantation est mis en forme pour correspondre à notre cadre générique de modélisation en ajoutant au rotor un paramètre privé,  $k_D$ , destiné à modéliser l'endommagement lié à la désaimantation. La perte de performance de la fonction du rotor en présence de la faute peut être estimée. Une loi de progression de la désaimantation par ruptures d'un aimant est proposée. Cette loi est fictive mais s'appuie sur des connaissances physiques. Une perspective intéressante serait de faire évoluer cette loi afin d'y intégrer les facteurs d'endommagement d'une

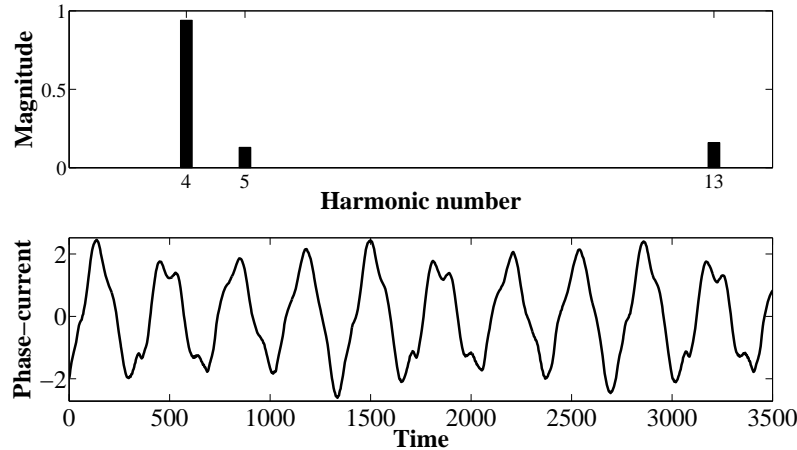


FIGURE 5.20 – Forme d'onde et spectre d'un courant de phase obtenu en essai sur une PMSM 8-9 avec un aimant désaimanté à 50%.

part, et de la vérifier lors d'essais de vie accélérés d'autre part.

Les simulations que nous avons réalisées sur notre prototype virtuel ont montré l'évolution progressive de notre résidu de désaimantation en fonction du pourcentage de désaimantation. Les résultats d'essais que nous avons réalisés sur la MSAP 8-9 ont corroborés nos résultats de simulation. Nous avons pu voir qu'il était possible de mesurer la valeur du résidu en ligne, de détecter la désaimantation d'un aimant, et d'attester de son état d'avancement.

Les essais ont été réalisés sur des machines dont le rotor a été détérioré mécaniquement pour créer la désaimantation, en ôtant une partie d'un aimant. Il serait intéressant de pouvoir désaimanter un aimant tout en gardant la même masse au niveau du rotor, pour ne pas créer de balourd mécanique.

Il serait possible de modéliser exactement de la même manière la désaimantation de plusieurs aimants du rotor.

### 5.1.3 Application de la méthode formelle de diagnostic et pronostic

#### 5.1.3.1 L'automate des modes de la MSAP

Les comportements nominaux et dans deux fautes différentes de la MSAP ont été décrits et modélisés. Nous considérons que ce sont tous les comportements possibles des machines. Cela nous permet de construire l'ensemble des modes composants et systèmes, et les automates des modes des composants, puis celui de la MSAP.

La figure 5.21 montre le modèle de la MSAP basé sur notre cadre de modélisation présenté à la fin du chapitre 2 et sur les études des modes de défaillance des sections 5.1.1 et 5.1.2. Cette figure synthétise toute la connaissance acquise sur le fonctionnement et le vieillissement des MSAP. On voit bien les trois composants de la couche fonctionnelle, le stator, le rotor et l'arbre, et leur manière de communiquer. Leurs performances sont liées à leurs fonctions objectif dans la couche performance et défaillance. Deux lois de vieillissement sont représentées, ce sont celles

liées au court-circuit entre spires et à la désaimantation partielle du rotor. Les lois de rétroaction montrent l'effet de l'endommagement sur les facteurs d'endommagement.

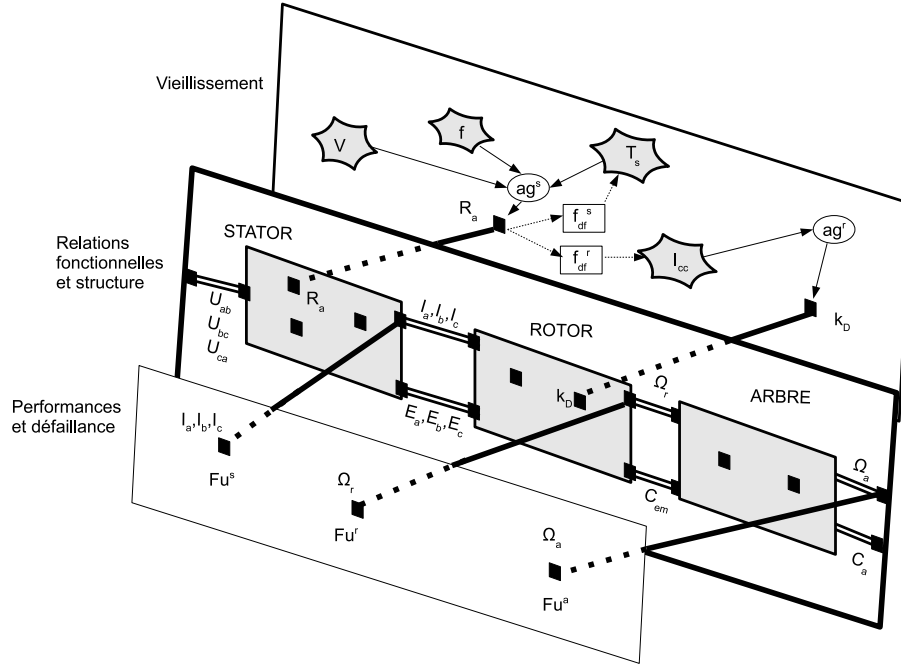


FIGURE 5.21 – Le modèle de la MSAP basé sur le cadre de modélisation en trois couches

Cherchons les modes de santé possibles pour les différents composants de la MSAP. Il y a une seule faute possible pour le stator avec deux seuils d'endommagement  $e_d^s$  et  $e_f^s$ , le stator aura donc trois modes possibles, le mode nominal  $m_n^s$ , le mode court-circuité  $m_d^s$ , et le mode de faute à cause du court-circuit  $m_f^s$ . Le rotor a également un mode nominal  $m_n^r$  et un mode de dégradation  $m_d^r$ , et la transition est liée au seuil d'endommagement  $e_d^r$ . Considérons que l'arbre ne peut pas être en faute. Il est en général en mode nominal  $m_n^a$ .

Ensuite, les évènements synchronisés sont définis. Lorsque le stator est en mode dégradé ou en mode de faute, alors sa sortie n'est pas nominale. Le rotor, qui lui est structurellement connecté, est en configuration anormale. Alors le couple électromagnétique est hors de son rang nominal, et l'arbre qui est structurellement lié au rotor est en configuration anormale.

Pour résumer les modes possibles des composants sont les suivants :

- $M^s = \{m_n^s, m_d^s, m_f^s\}$
- $M^r = \{m_n^r, m_d^r, m_a^r\}$
- $M^a = \{m_n^a, m_a^a\}$
- $M^e = \{m_n^e\}$

Les rangs associés aux modes des composants sont présentés en annexe 5.

L'ensemble des modes système possibles, avec toutes les paires de modes consistantes, est  $M^\Sigma = \{m_n^\Sigma, m_{d1}^\Sigma, m_{d2}^\Sigma, m_f^\Sigma\}$  avec :

- $m_n^\Sigma = \{m_n^s, m_n^r, m_n^a, m_n^e\}$
- $m_{d1}^\Sigma = \{m_n^s, m_d^r, m_a^a, m_n^e\}$
- $m_{d2}^\Sigma = \{m_d^s, m_a^r, m_a^a, m_n^e\}$
- $m_f^\Sigma = \{m_f^s, m_a^r, m_a^a, m_n^e\}$

Les automates des composants et de la MSAP sont présentés sur la figure 5.22. Les transitions

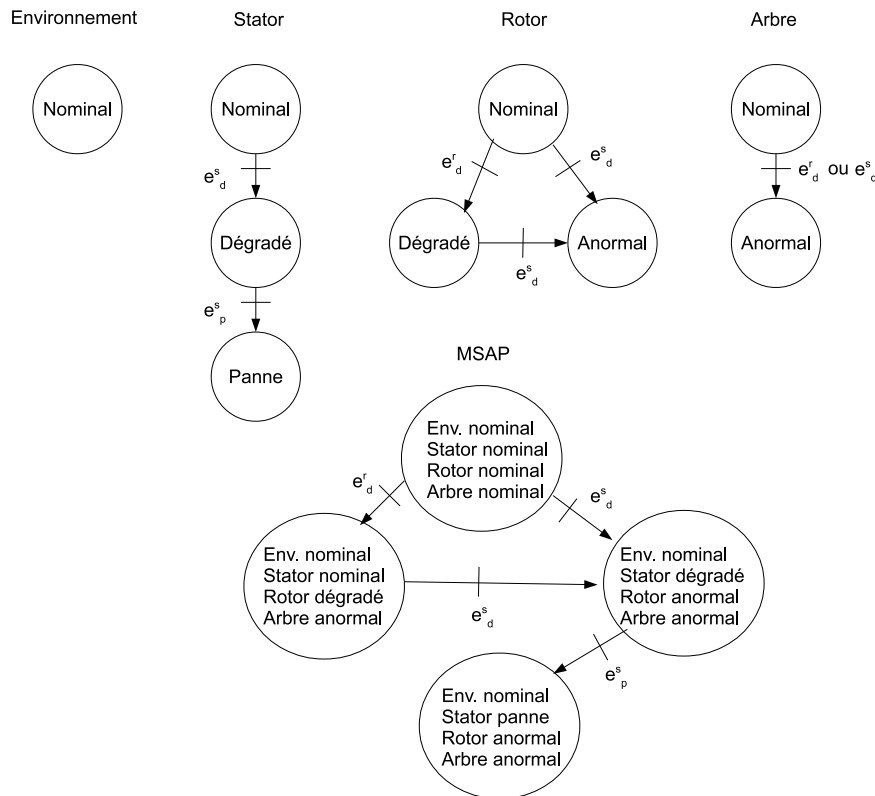


FIGURE 5.22 – Automate des modes de la MSAP et de ses composants

dans l'automate des modes sont représentées par des dépassements de seuil de l'endommagement ou par des paramètres d'entrée sortant de leurs rangs. Les automates des modes nous permettent d'appliquer les algorithmes de diagnostic et pronostic à la MSAP.

### 5.1.3.2 Application des algorithmes de diagnostic et pronostic à la MSAP

Les algorithmes de diagnostic et pronostic sont implémentés sous Matlab, et appliqués au prototype virtuel de MSAP.

Un scénario de court-circuit est implémenté. Le scénario utilise les lois présentées dans la partie 5.1.1.5, que nous considérons représenter parfaitement la réalité, à défaut d'autres connaissances.

En simulant la vie du stator de la MSAP 8-9 avec les paramètres suivants (certains paramètres, confidentiels, ne sont pas présentés ici), les courbes de la figure 5.23 sont obtenues.

```

R=2; // résistance de phase (Ohm)
L=0.017; // inductance de phase (H)
Sa = 0.5; // pourcentage de spires en court-circuit
R_{f0}=50; // valeur initiale de la résistance de court-circuit (Ohm)
w = 190; // vitesse électrique (tr/min)
U=22; // tensions d'alimentation (V)
T_a=20; // température ambiante (°C)
    
```

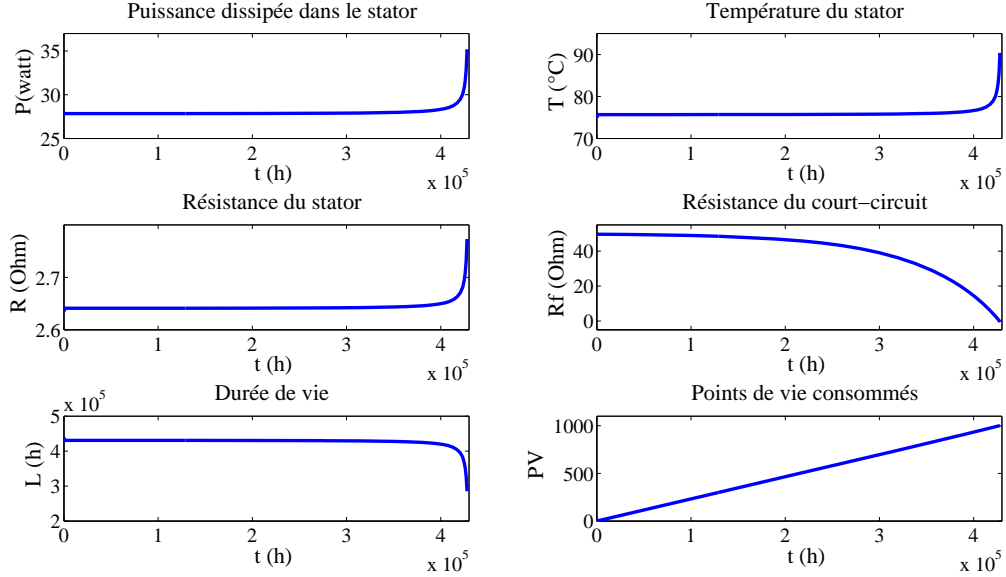


FIGURE 5.23 – Scénario de court-circuit

```

PV_0=1000; // nombre de points de vie initiaux
Rth1+Rth2=2; // résistance thermique entre le stator et l'environnement (K/W)
Pas_simu=1000; // pas de simulation (h)
L0=150000; b = -0.01; // paramètres de la loi de vieillissement
    
```

Les incertitudes sur les paramètres du moteur sont représentées sous forme de rang. La résistance est donnée à  $\pm 10\%$ , l'inductance à  $\pm 30\%$ , nous choisissons des valeurs réalistes dans ces rangs.

L'objectif est de démontrer que la faute est bien détectée, et diagnostiquée. De plus, les défaillances doivent être pronostiquées grâce à des lois de vieillissement et de rétroaction "réalistes", bien que fictives, présentant des incertitudes.

Le seuil de dégradation de l'endommagement statorique est fixé à  $e_d^s = 0.5$ , ce qui correspond à  $R_f = 1\Omega$  et  $A_{sc} = 1.5$ ; le seuil de faute de l'endommagement statorique est fixé à  $e_f^s = 0.7$ , ce qui correspond à  $R_f = 0.5\Omega$  et  $A_{sc} = 4.2$ ; la valeur d'endommagement de fin de vie utile est  $e^s(t^f) = 1$ , ce qui correspond à  $R_f = 0\Omega$  et  $A_{sc} = 4.8$  (voir les figures 5.5 et 5.4 qui justifient ces valeurs numériques).

Comme nous avons utilisé les lois que nous avons construites pour simuler le vieillissement "réel" du stator, nous ne pouvons pas les utiliser pour réaliser le diagnostic et le pronostic. Nous nous plaçons donc dans le cas où nous n'avons pas de connaissance précise du vieillissement. Nous choisissons une loi de rétroaction virtuelle, mais inspirée de la connaissance des experts :

- $T_s = 70C$  si  $e^s < e_d^s$
- $T_s = 80C$  si  $e_d^s < e^s < e_p^s$
- $T_s = 90C$  si  $e^s > e_p^s$

La loi de rétroaction est donc de la forme :

$$T_s(t) = f_{df}(e^s(t)) \quad (5.26)$$

Nous choisissons une loi de vieillissement en supposant que l'on connaît sa forme mais que l'on a des incertitudes sur certains paramètres. Pour rester proche de la loi de vieillissement présentée, nous prenons cette même loi (équations 5.13 et 5.14), qui peut être mise sous la forme  $L = L_0 e^{-df^s}$  avec  $df^s = k_1 + k_2 e^{-bT_s}$ . Les coefficients  $k_1$  et  $k_2$  sont des fonctions de  $F$  et  $V$ , avec les valeurs choisies pour ces facteurs d'endommagement constants, ils sont égaux respectivement à  $k_1 = 3.2532$  et  $k_2 = 1.2219$ . Nous modifions cette loi pour représenter les méconnaissances liées au vieillissement statorique.

Pour notre loi fictive nous choisissons  $k_1 = 3.3$  et  $k_2 = 1.2$ . Pour le paramètre  $b$  lié à la température, nous choisissons un rang  $[b_1, b_2]$ , avec  $b_1 = -0.012$  (ainsi le facteur température aura plus d'influence que dans la loi "réelle"), et  $b_2 = -0.01$  (vraie valeur), ce qui permet de représenter les incertitudes sur l'influence de la température. La durée de vie moyenne calculée par la loi de vieillissement aura donc également la forme d'un intervalle  $[L_1, L_2]$ , où les deux bornes sont calculées avec respectivement  $b_1$  et  $b_2$ .

Enfin, dans notre prototype virtuel nous ne modélisons pas la dépendance de la résistivité des phases à la température statorique, les valeurs des résistances de phase sont constantes, égales à  $2.2\Omega$ .

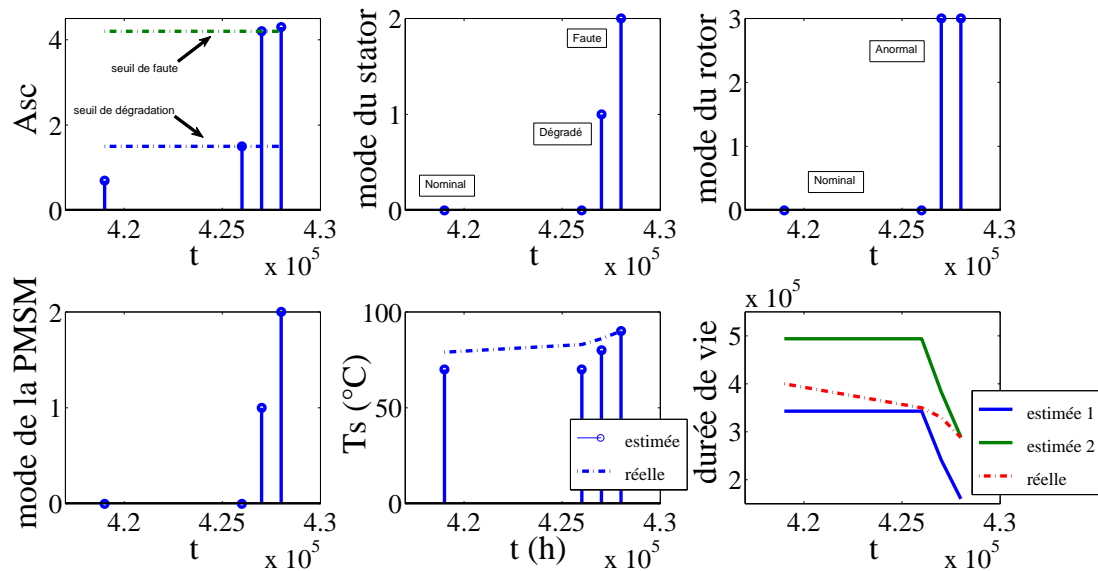


FIGURE 5.24 – Résultats des algorithmes de diagnostic et pronostic appliqués au scénario fictif de court-circuit.

Les résultats issus du module de diagnostic et de pronostic sont présentés sur la figure 5.24. Le résidu de court-circuit  $A_{sc}$  est observé et les dépassement de seuils sont détectés. Les modules de diagnostic locaux déterminent le mode du stator et du rotor, et le module de diagnostic global détermine le mode de la MSAP. La température statorique est estimée grâce à la loi de rétroaction, et la durée de vie est estimée avec la loi de vieillissement. On remarque que la durée de vie "réelle" se trouve toujours entre les bornes estimées, signe que le résultat de pronostic est exact sur cet exemple.

### 5.1.3.3 Conclusion

Les algorithmes de diagnostic et de pronostic ont été implémentés sous Matlab et appliqués au prototype virtuel de la MSAP avec un scénario fictif de court-circuit. Les résultats obtenus correspondent à nos attentes. Cela montre l'applicabilité de la méthode. Cependant si nous souhaitons appliquer cette méthode à des équipements réels, il est nécessaire de travailler à l'obtention des lois de vieillissement et des lois de rétroaction réelles, car ces données d'entrée sont indispensables.

### 5.1.4 Conclusion

Dans cette partie, le suivi de l'état de santé du moteur électrique a été présenté.

Deux fautes, sélectionnées pour leur criticité, ont été traitées. Il s'agit des courts-circuits entre spires d'une même phase et de la désaimantation partielle du rotor. Les deux fautes ont été étudiées et modélisées de manière générique. Des résidus analytiques ont été développés. Ils sont basés sur les courants de phases, observables sans ajout de capteur. Le fait que les résidus soient basés sur des équations issues de la physique plutôt que sur de la simulation ou de l'expérimentation seulement permet à la fois un raisonnement scientifique sur la compréhension du mode de défaillance et une généralisation de la méthode quelle que soit la typologie de MSAP considérée. La performance des fonctions de la MSAP peut être estimée en présence des fautes.

L'évolution des fautes en fonction des facteurs d'endommagement a été présentée. Ne disposant pas de données sur le vieillissement des MSAP, nous adaptons une loi de vieillissement obtenue à partir d'essais sur des plaques d'isolant dans [LFMM11] pour le court-circuit, et nous définissons une loi de vieillissement fictive mais basée sur un raisonnement physique pour la désaimantation partielle du rotor.

La MSAP en présence des deux fautes est ainsi modélisée conformément au cadre formel de modélisation présenté dans le chapitre 2, et son comportement est représenté sous forme d'automates des modes.

Les simulations que nous avons réalisées sur notre prototype virtuel ont montré l'évolution progressive de nos résidus en fonction de l'évolution de l'intensité du court-circuit ou du pourcentage de désaimantation. Les résultats d'essais que nous avons réalisés sur deux types de machines ont corroborés nos résultats de simulation. Nous avons pu voir qu'il était possible de mesurer la valeur des résidus en ligne, de détecter la présence des fautes, et d'attester de leur état d'avancement.

Grâce à l'étude théorique approfondie du vieillissement du stator, nous avons simulé l'apparition et la progression d'un court-circuit sur une MSAP 8-9. Les algorithmes de diagnostic et de pronostic ont été implémentés sous Matlab, et appliqués au prototype virtuel de la MSAP avec le scénario fictif de court-circuit. Des lois de vieillissement et de rétroaction simplifiées ont été utilisées dans l'algorithme de pronostic. Les résultats issus des simulations montrent l'applicabilité de notre méthode à cette faute ; cependant une application réelle nécessiterait la connaissance des lois de vieillissement et de rétroaction réelles.



## 5.2 Le suivi de l'état de santé de la pompe hydraulique

Pour la pompe hydraulique, la difficulté de l'approche réside dans le fait est que les fautes sélectionnées dans le chapitre 4, naissant essentiellement d'une usure par contact mécanique, nécessitent donc de bonnes connaissances tribologiques pour être modélisées. Ces phénomènes physiques sont encore mal connus et modélisés mais leurs conséquences sur les performances de la pompe en tant que dispositif de transformation d'énergie mécanique en énergie hydraulique sont souvent observables et mesurables, sous la forme de pertes de rendement mécanique ou volumétrique.

Pour ce composant le premier effort porte donc sur l'amélioration du modèle comportemental afin de pouvoir localiser les conséquences de l'apparition de fautes liées à l'usure.

### 5.2.1 Prototype virtuel

Les modèles de pompe jusqu'alors utilisés chez MBD étaient des modèles globaux qui ne faisaient pas apparaître explicitement les différents composants de la pompe. Un gros effort de modélisation a donc été réalisé pour élaborer des modèles plus précis, en descendant au niveau des différents composants, et en faisant notamment apparaître les pistons, la transmission mécanique par engrenage entre l'arbre et le barillet, et la présence d'un jeu entre la glace et le barillet (voir chapitre4).

La démarche reste la même que pour l'étude des MSAP. Un modèle analytique a été construit, qui doit permettre la construction analytique des résidus de faute. Par ailleurs, un prototype virtuel est construit pour se substituer à la réalité afin d'évaluer le comportement du composant en présence de faute. Ce prototype virtuel est conçu dans l'environnement de simulation multiphysique Amesim ([LMS13]). Par rapport au modèle analytique, il permet de représenter également :

- la dépendance des propriétés du fluide à la température et à la pression ;
- le déplacement du barillet en translation dans le corps de pompe, avec la une hauteur de jeu entre la glace et le barillet qui varie en fonction de la vitesse et de l'équilibre des pressions ;
- l'effet de pompage à l'arrière des pistons.

La température a une grande influence sur les valeurs des paramètres du prototype virtuel, et notamment sur les coefficients de frottement et la viscosité du fluide. Il est donc important de la prendre en compte. A basse température, l'huile est très visqueuse. Comme elle s'oppose à l'écoulement, il y a moins de fuites. Par contre il y a d'avantage de forces de cisaillement, qui augmentent le frottement visqueux, ce qui dégrade le rendement mécanique. Au contraire à haute température l'huile est très fluide. Les fuites sont plus importantes et le rendement volumétrique se dégrade.

Malgré les évolutions que nous avons apportées au prototype virtuel, il reste encore de nombreuses incertitudes sur le comportement de la pompe et donc sur le modèle.

Le point dur dans la modélisation de la pompe est que de nombreux phénomènes sont tridimensionnels, tant au niveau de la cinématique de transformation de mouvement qu'au niveau des écoulements. Par exemple, les phénomènes qui se manifestent, en particulier au niveau des paliers fluides et des étanchéités dynamiques, sont tridimensionnels et à paramètres distribués.

La modélisation selon une approche mono-dimensionnelle et à paramètres localisés est une tâche délicate pour conserver un bon réalisme en représentant de façon suffisante ces phénomènes réels importants pour l'étude. Par exemple, on connaît mal la situation du piston par rapport au puits de barillet : son axe est-il confondu avec l'axe du puits, est-il excentré sous les effets centrifuges, et/ou non parallèle à cause des actions de la biellette ? Un autre problème est le manque d'essais ciblés disponibles, ce qui ne permet pas d'identifier des modèles de représentation.

La géométrie du barillet et de la glace est très simplifiée dans notre modèle car cette géométrie n'est pas forcément générique. L'assimilation à des géométries génériques pour lesquelles on peut disposer de modèles analytiques constitue une forte simplification de la réalité qui manque de représentativité. Il faudrait donc pousser l'étude jusqu'à la tribologie pour bien comprendre les phénomènes locaux. Il serait possible de réaliser des calculs numériques tridimensionnels à paramètres localisés en régime stationnaire pour tirer des modèles de représentation, par exemple sous forme de méta modèles paramétrés en pression, vitesse et température. Par contre, considérer en plus le caractère transitoire placerait le calcul à limite de l'état de l'art des logiciels commerciaux.

La manière dont est transmis l'effort mécanique de l'arbre moteur au barillet est mal connue. Il est difficile d'estimer les pertes qui passent par l'engrenage.

La manière dont s'établit le film d'huile entre la glace et le barillet est également mal connue. Cela dépend énormément de la viscosité du fluide, dont la valeur en service peut évoluer d'un facteur 1000 avec la température, et également de la vitesse de la pompe et des pressions qui règnent à leur interface. En service, les pompes gardent toujours une vitesse minimale (de l'ordre du tour par seconde) pour maintenir la pression de sortie à la valeur requise par la charge, sans débit lorsqu'elle est immobile. Cette rotation de pompe produit un débit vers le drain qui est nécessaire à l'établissement du film fluide entre les pièces mobiles pour limiter le contact solide entre la glace et le barillet et l'usure qui en découlerait. Il y a donc un compromis à trouver entre la fuite (les pertes hydrauliques) et l'usure (la durée de vie).

Certains phénomènes tridimensionnels ne sont pas représentés, par exemple on ne représente pas le débattement radial des biellettes. Une solution serait de modéliser ces aspects en 3D multicorps rigide, par exemple en réalisant une co-simulation entre les logiciels Adams et AMESim. Le modèle établi n'est pas encore parfaitement réaliste pour tous les phénomènes locaux. Cependant nous l'avons souhaité le plus fidèle possible et il permet de représenter certains des phénomènes qui ne sont pas représentés dans les modèles existant chez Messier qui sont plutôt dédiés à la conception. Ceci représente déjà une amélioration importante.

Notre prototype virtuel permet notamment la décomposition organique précise permettant de localiser les pertes et les fautes le cas échéant. Il est bien représentatif des transformations d'énergie de la pompe hydraulique. Il a une meilleure représentativité des phénomènes locaux que les modèles usuels, mais la représentativité n'est pas encore parfaite. Les fautes sélectionnées dans le chapitre 4 sont tout de même caractérisées, et des pistes de modélisation sont proposées, et resteraient à inclure dans un prototype virtuel encore plus réaliste.

## 5.2.2 Caractérisation et modélisation des fautes de la pompe hydraulique

### 5.2.2.1 Usure des alésages du barillet pouvant aller jusqu'au grippage

**Causes et conséquences** L'usure des alésages du barillet et des pistons est une usure naturelle, qui se produit dès la mise en service. Cette usure peut être accélérée par le manque de lubrification ou par la pollution du fluide.

Les conséquences de l'usure sont diverses. La pollution du fluide hydraulique va entraîner une usure d'autant plus importante. La prise de jeu au niveau des pistons va augmenter les fuites internes notées  $Q_{Rbi}$  dans le modèle présenté en 4.2.2. Plus globalement, une augmentation des fuites internes entraîne une réduction du débit au refoulement pour une vitesse d'entraînement et une pression différentielle délivrée, qui traduit une perte de rendement volumétrique. L'usure peut aller jusqu'au grippage, un transfert de matière arrachée sur les surfaces et redéposée par microsoudure. A ce moment-là, le piston peut être coincé dans l'alésage, ce qui va entraîner soit un blocage de la pompe, soit un dessertissage de la bielle, tirillée entre la force du plateau moteur et la force du piston bloqué. Cela peut entraîner une perte de débit fonctionnel, mais conduit rapidement à la destruction de la pompe par blocage mécanique.

**Pistes de modélisation** Il est possible de modéliser directement les conséquences de la dégradation, à savoir une augmentation des fuites internes au niveau des pistons, par action sur le jeu piston-alésage. Grâce à notre modèle qui détaille chaque piston, nous avons maintenant la possibilité d'intégrer le défaut sur un seul ou sur plusieurs pistons. Cependant, la modification du diamètre d'un piston ne représente pas parfaitement le défaut. En effet, il y a des incertitudes sur le positionnement du piston dans les puits de barillet car nous avons considéré que le piston était radialement centré dans le puits et parallèle aux parois. Or il est possible qu'il s'arc-boute sous l'effet des forces liées au fluide, ou qu'il se rapproche de la paroi extérieure sous les effets centrifuges à haute vitesse. Ces phénomènes sont mal connus et n'ont pas fait l'objet d'expérience ciblées. On sait que se combinent les effets inertiels, le champ de pression autour du piston la force de frottement global, mais on les quantifie mal, en particulier en fonction du jeu radial et de l'excentricité. A priori, une fois les paliers hydrostatiques et hydrodynamiques établis les pistons restent centrés dans les alésages et subissent un effet centrifuge radial (forcés à tourner par le barillet) et un effet inertiel axial (forcés à se translater par les biellettes). Un calcul rapide montre que cette dernière composante est négligeable devant la première. Les choses ne sont pas si simples dans la réalité. Notamment à grande vitesse de rotation, l'effet centrifuge devient important (fonction du carré de la vitesse), et l'excentricité augmente, sans que l'on sache le quantifier puisqu'elle dépend de la composante radiale des efforts de pression qui s'exercent sur le piston. Or l'excentricité a une grande influence sur la force de frottement comme nous avons pu le montrer en simulation ([Mai12]). De plus, nous avons modélisé l'angle des axes brisés de la pompe constant de  $20^\circ$  qui représente l'angle entre l'axe de l'arbre d'entraînement et l'axe du barillet. Comme pratiqué usuellement, nous avons supposé que la bielle est parallèle à l'axe du barillet. Cependant des études approfondies réalisées dans le cadre de ce projet ([Met12]) montrent que les biellettes ont un angle compris entre  $18.6^\circ$  et  $21.5^\circ$  par rapport à l'axe de l'arbre moteur, donc pas toujours égal à  $20^\circ$ . Il est donc d'autant plus légitime de se poser la question de l'alignement des pistons avec les parois de l'alésage. Pour conclure, des avancées sur les phénomènes locaux doivent encore être réalisés pour modéliser l'usure des alésages du barillet.

**Lois de vieillissement** Comme le vieillissement lié à l'usure des pistons/puits de barillet s'auto-alimente via la pollution solide qu'il engendre, on peut supposer qu'une loi de forme exponentielle est bien adaptée pour représenter l'évolution du défaut dans le temps. On a d'ailleurs ici une bonne illustration de la boucle de rétroaction présentée en partie 2.2.3, avec l'usure qui augmente la pollution, qui est elle-même un facteur d'endommagement favorisant l'usure.

Pour valider ce choix expérimentalement, on pourrait user artificiellement le barillet ou le piston, ou provoquer la pollution du fluide. Cette dernière approche est une pratique difficile à mettre en œuvre mais bien établie industriellement (par exemple par adjonction de silice calibrée et en proportion maîtrisée).

### 5.2.2.2 Rayures et érosion des faces de distribution glace et barillet

**Causes et conséquences** Là encore l'usure des faces de distribution de la glace et du barillet est due à la pollution du fluide et/ou au manque de lubrification. Il peut également y avoir des arrachements de matière dus à la cavitation (création de bulles de vapeur de liquide hydraulique en cas de faible pression lors de la phase d'aspiration puis implosion de ces bulles lors de la phase de compression rapide par le piston).

Les conséquences sont un risque d'augmentation du couple de frottement et donc une perte de rendement mécanique, mais aussi une augmentation des fuites internes via les débits  $Q_{Rgi}$ ,  $Q_{RA}$  et  $Q_{RB}$  et donc une perte de rendement volumétrique (voir la figure 4.16).

**Piste de modélisation** Pour modéliser ce phénomène, on peut amplifier les pertes à la distribution par action sur les paramètres utilisés pour le calcul du débit de fuite.

Comme le coefficient de frottement entre la glace et le barillet n'apparaît pas explicitement dans le modèle, il pourrait être intéressant de l'intégrer pour pouvoir injecter volontairement des défauts en vue du test virtuel des algorithmes de HM.

Il faudrait étudier comment varie la hauteur du film entre la glace et le barillet en fonction de la pression et durant les phases d'accélération et de décélération de l'arbre d'entraînement, pour quantifier les débits de fuite interne. L'usure peut modifier la géométrie de la surface de la glace de distribution et de ses lunules. On aurait alors potentiellement deux effets : un changement du coefficient de débit  $C_q$  produit par l'érosion des arêtes des orifices, et une modification de la surface.

### 5.2.2.3 Ecaillage des roulements à billes pouvant mener au grippage

**Causes et conséquences** Plusieurs causes peuvent entraîner une usure ou un écaillage des roulements. On trouve encore la pollution et le manque de lubrification, mais aussi les charges trop importantes ou déséquilibrées, les inversions de vitesse et les vitesses trop importantes, les vibrations liées soit à l'environnement soit à un fonctionnement dégradé de la pompe, les écarts de température, et la fatigue.

Les conséquences sont des vibrations à des fréquences caractéristiques, ainsi que le bruit qu'elles occasionnent. Il y a aussi une augmentation de la pollution à cause de l'écaillage. On peut voir

apparaître une perte de précision de guidage suite à l'apparition de jeu dans le roulement et donc dans tout l'équipage mobile qui lui est associé ; notamment au niveau du mouvement du barillet dans le corps de la pompe. Enfin l'écaillage des roulements se traduit par une augmentation du couple de frottement et par une perte de rendement mécanique.

Un usage prolongé du roulement écaillé peut mener à la rupture ou au grippage. D'après [QLE09], la phase de bris apparaît en 4 étapes : les vibrations produites par les défauts dans les deux premières étapes apparaissent à hautes fréquences et à très bas niveaux. Les premiers défauts de ces deux premières étapes n'affectent pas sérieusement les performances des composants. Lors de la troisième étape les problèmes augmentent à cause de l'usure et les fréquences de défauts de roulement apparaissent. Ces fréquences correspondent à la fréquence de passage d'un élément roulant (bille ou rouleau) au niveau du chemin de roulement intérieur ou extérieur. Ce sont les BPGI ou BPGO (Ball Pass Frequency of the Inner/Outer race). Ces fréquences sont proportionnelles à la vitesse de rotation et au nombre de billes du roulement. La quatrième étape est le bris du roulement, donc c'est dès la troisième étape que les roulements doivent être remplacés.

**Piste de modélisation** Comme pour les autres défauts, il est possible de modéliser directement les conséquences de l'écaillage du roulement, via une augmentation des pertes mécaniques, par exemple sur les coefficients de perte dans le modèle de roulement via un gain et/ou par l'ajout d'une perte cyclique génératrice de fréquences caractéristiques. Cependant, il faut garder à l'esprit que la modélisation des roulements en présence de défaut est complexe et non établie industriellement. Les formules les plus couramment utilisées pour caractériser la fiabilité des roulements sont celles que l'on trouve sur le site de SKF, le leader mondial dans la technologie des roulements (voir [SKF13]).

**Lois de vieillissement** Des études de fiabilité donnent une estimation de la durée de vie (en nombre de cycles de fatigue) en fonction des contraintes équivalentes, ou la probabilité de défaillance en fonction de la durée de vie (voir [Lig09]).

D'autres travaux existent dans la littérature, les roulements sont assez étudiés. Par exemple [SLL11] utilise la loi de Paris, qui décrit la propagation d'une fissure dans le roulement. [QLE09] utilise une loi de vieillissement basée sur les données de vibration.

#### 5.2.2.4 Dessertissage des rotules de la bielle côté grain ou côté piston

**Causes et conséquences** Une usure importante d'une bielle peut entraîner son dessertissage. Un jeu trop important entraîne un débattement radial et axial excessif, la bielle est alors soumise à des vibrations non linéaires qui peut entraîner son dessertissage. Comme déjà mentionné, le dessertissage peut aussi se manifester lorsqu'un piston est grippé dans son alésage.

La conséquence du dessertissage d'une bielle est une détérioration rapide de la pompe.

**Piste de modélisation** Le jeu au niveau des rotules n'apparaît pas encore dans le prototype virtuel. Il est donc impossible d'introduire ce défaut. Pour quantifier le risque de dessertissage,

on pourrait s'intéresser à la tenue en fatigue du sertissage qui est soumis à des sollicitations alternées (avec inversion de signe) et combinées (traction/compression et rotulage) à fréquence élevée ( $250\text{Hz}$  à  $15000\text{tour}/\text{mn}$ ). L'influence de la température sur la lubrification est également à regarder de près. Pour l'instant, on ne dispose malheureusement pas de résultats expérimentaux ou numériques relatifs pour suggérer/valider des modèles utiles pour l'évaluation de la tenue mécanique du sertissage. Dans notre prototype virtuel Amesim, la transformation de mouvement réalisée par les biellettes est modélisée avec un élément de type "came" pour lier sous forme tabulée le mouvement de rotation de l'arbre d'entraînement par rapport au corps, au mouvement de translation du piston par rapport au puits de barillet. Cette transformation de puissance, supposée parfaite, permet également d'accéder aux efforts d'activation axiale du piston, dans la limite des hypothèses énoncées ci-dessus (biellette dans l'axe du piston) ([Mai12]).

### 5.2.2.5 Conclusion

Les fautes sélectionnées dans le chapitre 4 ont été caractérisées et des pistes de modélisation ont été proposées. Cependant sans une meilleure connaissance des phénomènes locaux dans la pompe, il semble difficile d'appliquer une méthode de diagnostic et pronostic à base de modèles physiques.

### 5.2.3 Les principaux types d'analyse des défauts

Malgré les avancées importantes que nous avons faites en modélisation, nous réalisons qu'il est encore difficile de modéliser les défauts qui nous intéressent. Une perspective intéressante pour cette application serait d'utiliser une méthode de diagnostic sans modèle. Plusieurs types d'analyse peuvent justement être utilisés pour détecter et diagnostiquer les défauts dans les pompes hydrauliques, comme le montre le tableau 5.2.3.

### 5.2.4 Conclusion et perspectives

Finalement, il apparaît que pour la pompe, il y a davantage de méconnaissances que pour le moteur électrique. Le manque est accentué par l'insuffisance de retours d'expérience et de résultats d'essais.

Le seul observable disponible actuellement sur la pompe est la vitesse de rotation de l'arbre d'entraînement par rapport au corps, directement accessible via l'EdP. Certains paramètres sont reconstituables à partir du vérin et du moteur :

- les courants statoriques permettent d'estimer le couple électromagnétique, qui permet à son tour de reconstruire le couple mécanique appliqué à la pompe après soustraction des couples inertiels et dissipatifs de la pompe. Cependant ces couples liés aux imperfections sont difficiles à obtenir avec précision et sans bruit (le couple inertiel requiert la double dérivation de la position relative du rotor, les couples de frottement dépendent fortement des conditions d'opération) ;
- le débit fourni par la pompe peut être estimé à partir de la vitesse de la tige du vérin. Encore une fois, cette estimation est bruitée et peu précise. En effet, il ne faut pas oublier les imperfections introduites par effets capacitifs (compressibilité du fluide) et dissipatifs (fuites internes du bloc hydraulique) qui engendrent des débits parasites.

Type d'analyse	Principaux avantages	Principales limitations	Champ d'applications
Analyse vibratoire	Détection des défauts. Possibilité d'un diagnostic approfondi. Largement utilisé.	Détection macroscopique. Détection à des fréquences inférieures à 10 KHz. Détection parfois tardive.	Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine et de sa structure.
Analyse d'huile	Détection d'une pollution anormale de l'huile. Détection dès le début du détachement de particule en statique et en dynamique. Coût relativement faible. Interprétation facile des résultats.	Ne permet pas de localiser précisément le défaut.	Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure.
Thermographie	Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation.	Détection des défauts à un stade moins précoce. Contrôle limité (échauffements de surface) et besoin d'une dissipation thermique. Diagnostic pas approfondi.	Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier).
Analyse acoustique	Suivi de fonctionnement. Sensibilité. Méthode globale. Détection des défauts à un stade précoce.	Sensibilité au bruit ambiant. Défauts non évolutifs invisibles. Diagnostic parfois difficiles des systèmes mécanique complexes.	Détection d'un bruit inhabituel. Détection en dynamique et en statique.

TABLE 5.1 – Les types d'analyse pour la détection et le diagnostic des fautes des pompes hydrauliques

Il y a par contre possibilité d'ajouter des capteurs de pression ou d'effort, car ces capteurs sont suffisamment matures pour des tâches de HM. Il faut cependant évaluer les contraintes liées à leur intégration géométrique et au traitement des signaux.

Lorsque les grains grippent, il y a une diminution de couple mécanique, et les efforts de frottement remontent au niveau du moteur, il faut donc fournir plus de couple électromagnétique pour développer la même pression différentielle. Lorsque les frottements entre un piston et le puits de barillet augmentent, on a également une perte de couple mécanique. Ainsi, comme ce genre de défauts produit une baisse du rendement mécanique, il serait donc intéressant d'observer la transformation entre la pression différentielle aux bornes de la pompe et le couple mécanique d'entraînement de la pompe estimé d'après la mesure des courants statoriques. Pour disposer de la pression différentielle aux bornes de la pompe, on pourrait utiliser un capteur d'effort transmis à la charge par la tige de vérin. Ce type de capteur a déjà été évalué en conditions réelles dans le cadre du projet COVADIS ([DTS11]). Ainsi, à condition que les signaux soient suffisamment

riches, on disposerait d'une observation de la transformation du couple mécanique moteur en effort sur la charge mettant en avant le rendement mécanique.

En cas d'augmentation de fuite interne, par exemple à cause d'un jeu plus important entre les pistons et les puits de barillet, ou entre la glace et le barillet, on a cette fois-ci une baisse de rendement volumétrique. Il est alors intéressant d'observer la transformation de la vitesse d'entraînement de pompe en débit fourni.

Globalement, nous supposons que la première manifestation d'un défaut est l'augmentation des frottements et donc de l'effort d'entraînement. La seconde manifestation lorsque le défaut est plus évolué est l'augmentation des fuites internes. Le problème est que l'on a du mal à observer les augmentations d'efforts car elles sont de faible amplitude et certainement noyées dans le bruit. L'augmentation de fuites internes est semble-t-il plus facilement détectable, cependant le défaut est déjà suffisamment avancé pour qu'il y ait eu une usure, voire un arrachement de métal. La pollution qui en résulte accélère l'usure et conduit rapidement au grippage. Si ces pistes de HM semblent prometteuses, il sera important d'établir des seuils de détectabilité d'augmentation d'effort et de fuite pour confirmer leur intérêt.

## Conclusion

La méthode de suivi de l'état de santé développée dans les chapitres 2 et 3 a été appliquée à deux composants critiques de l'ensemble moto-pompe : la MSAP et la pompe hydraulique.

Deux fautes des MSAP ont notamment été étudiées en détail : les courts-circuits entre spires d'une même phase et la désaimantation partielle du rotor. Des simulations corrélées par des expérimentations ont permis de valider les résidus de faute construits analytiquement, et le diagnostic de ces fautes. Le pronostic de ces fautes a été présenté sur un prototype virtuel, avec des lois de vieillissement fictives.

Nous avons privilégié les capteurs déjà existants pour le contrôle de l'équipement, afin de ne pas ajouter de capteurs qui augmenteraient le poids et dé-fiabiliseraient l'actionneur.

Une perspective prometteuse pour ces travaux autour du diagnostic et du pronostic des MSAP serait d'obtenir d'avantage de données sur leur vieillissement, ce qui permettrait de construire des lois de vieillissement adaptées.

Pour la pompe hydraulique, il y a plus de méconnaissances que pour le moteur. Nous manquons à la fois de données d'essais, et à la fois de connaissance sur tous les phénomènes locaux, notamment ceux se rapprochant de la tribologie. Or les fautes de la pompe hydraulique sont essentiellement liées à des usures dues aux contacts entre composants. Ce sont donc essentiellement des pistes sur les efforts de modélisation à fournir pour pouvoir appliquer la méthode de diagnostic et pronostic à base de modèles, et des pistes de techniques de diagnostic sans modèles, qui ont été présentées.

Ces applications ont montré que le cadre de modélisation et la méthode formelle sont adaptés à des composants différents, ici électriques et hydrauliques, et permettent d'obtenir des résultats probants, sous réserve que la connaissance de l'équipement sous forme de modèle soit obtenue au préalable.







# Conclusions et perspectives

## Conclusion

Durant ces travaux de recherche nous avons souhaité développer une méthode générique de suivi de l'état de santé des équipements. L'application à un module moto-pompe d'actionneur électro-hydrostatique de commande de vol est motivée par le contexte industriel de l'avion plus électrique.

Après une étude poussée de la littérature dédiée au diagnostic et au pronostic, nous avons pesé les avantages et les inconvénients des trois grandes familles de méthodes, le diagnostic/pronostic basé sur l'expérience, guidé par les données, et basé sur les modèles. Nous avons conclu que la méthode à base de modèles est la mieux adaptée à notre objectif de développer une méthode générique et évolutive, dans notre contexte aéronautique où la connaissance des équipements est souvent basée sur les modèles.

Nous avons tout d'abord construit un cadre formel de modélisation de la vie d'un équipement, représentant le comportement d'un équipement complexe à tout instant, et représentant aussi son vieillissement via l'évolution de son état de santé et ses répercussions sur l'état fonctionnel. Le cadre de modélisation sur trois niveaux, fonctionnel, vieillissement, et performance, synthétise toutes les informations nécessaires au diagnostic et au pronostic.

Nous nous sommes basés sur ce cadre formel pour proposer une méthode générique de diagnostic et de pronostic, basée sur l'étude de résidus observables pour le diagnostic, et prédictibles pour le pronostic. Nous avons proposé un indice de qualité pour évaluer la confiance que l'on peut avoir dans le module de pronostic. Les métriques de performance du diagnostic et de pronostic, et les concepts de diagnosticabilité et pronosticabilité, ont été définis et décrits dans notre cadre formel.

Le comportement du module moto-pompe a été décrit dans son environnement, l'actionneur électro-hydrostatique, également constitué d'une électronique de puissance et d'un vérin. Les défaillances critiques du module moto-pompe ont été sélectionnées puis analysées. Les comportements du moteur électrique et de la pompe hydraulique ont été modélisés, et les modèles ont pu s'intégrer parfaitement dans notre cadre formel.

Des pistes de modélisation ont été proposées pour pouvoir appliquer la méthode à la pompe hydraulique, pour laquelle les méconnaissances sont encore trop nombreuses. Une alternative à notre méthode a été proposée avec la présentation de techniques de diagnostic sans modèle pouvant être appliquées à des pompes hydrauliques.

Deux fautes du moteur ont été étudiées en détail, les courts-circuits entre spires d'une phase du stator et la désaimantation partielle du rotor. Les résidus ont été construits analytiquement, et vérifiés en essai. Les lois liées au vieillissement du stator et du rotor ont été proposées. Les

algorithmes de suivi de l'état de santé ont été développés sous Matlab. Ils ont été testés sur un prototype virtuel de machine synchrone à aimants permanents développé sous Matlab Simulink, avec un scénario fictif de progression d'un court-circuit entre spires. Les résultats ont montré le fonctionnement du diagnostic, et que le pronostic du moteur est possible, à condition d'avoir obtenu au préalable la connaissance nécessaire sur le vieillissement du stator.

## Perspectives

### Perspectives académiques

Une perspective intéressante serait de pouvoir intégrer au cadre de modélisation, plus formellement, les autres méthodes de diagnostic et pronostic, à savoir basées sur l'expérience ou guidées par les données. Par exemple, pour les méthodes guidées par les données, les modèles sont de type "boîte noire". La représentation du système pourrait être la même que celle que nous avons proposée, mais sans la connaissance précise des paramètres privés et des relations analytiques entre les paramètres. Cela augmenterait encore la généralité du cadre formel, et par là même l'étendue de son domaine d'application. De plus, cela faciliterait le fait de combiner plusieurs méthodes de diagnostic et/ou pronostic, ce qui est intéressant pour de nombreuses applications, notamment lorsque les sources de connaissances sont variées et de différentes natures.

Pour la méthode formelle de suivi de l'état de santé, une perspective sur le court terme serait d'étudier la manière de choisir la fréquence d'appel aux algorithmes de diagnostic et de pronostic. On pourrait par exemple l'ajuster à l'état de santé du système et à la criticité des fonctions.

Une étude des modes de vieillissement les plus fréquents pourrait permettre de probabiliser l'automate des modes, ce qui pourrait être utile par exemple lorsque plusieurs hypothèses d'évolution sont proposées par le module de pronostic.

Ces perspectives académiques ont bien sûr vocation à plus long terme à être appliquées au monde de l'industrie, aéronautique entre autres. Sur le court et le moyen terme, d'autres perspectives industrielles sont proposées.

### Perspectives industrielles

Sur le court terme, pour ce qui est de l'application à l'actionneur électro-hydrostatique, nous pensons à de nombreuses voies d'évolution.

Pour la pompe hydraulique, la création d'un modèle plus précis, qui permettrait de représenter les phénomènes locaux, liés à la tribologie notamment, serait utile pour appliquer notre méthode à cet équipement. Cette activité, en cours, pourrait être supportée par des études 3D et des essais dédiés.

Il serait également intéressant de suivre l'état de santé de l'électronique de puissance, qui est un composant défabibilisant de l'actionneur. Cependant la méthode à base de modèles n'est pas forcément la mieux adaptée pour ces composants, qui ont le plus souvent des fautes aléatoires et non progressives, et donc difficiles à surveiller.

Des essais sur les moteurs électriques sont actuellement en cours pour étudier le vieillissement du stator. Cela devrait permettre d'obtenir les lois de vieillissement et de rétroaction, nécessaires au module de pronostic pour une application réelle.

De manière plus générale la perspective la plus évidente pour qui souhaite appliquer une méthode de pronostic à base de modèles est d'étudier de manière approfondie le vieillissement de l'équipement, par exemple via des essais de vie accélérés, pour connaître les lois nécessaires à la méthode. Si ces connaissances ne sont réellement pas accessibles, ou seulement à un coût rédhibitoire, il est alors préférable de s'orienter vers d'autres méthodes de pronostic.

Du côté des lois de vieillissement, nous avons émis l'hypothèse que ces lois ont des formes connues et dépendantes du type d'endommagement. Il serait intéressant de vérifier cette hypothèse, et de créer une bibliothèque de lois de vieillissement génériques, dont seuls les paramètres seraient à recalibrer suivant les équipements. Le module de pronostic pourrait ensuite être adapté pour traiter ces types de lois en particulier. Cette perspective nécessite du temps car l'étude du vieillissement des équipements est longue et coûteuse.

Nous avons ici évoqué l'idée de réaliser la surveillance de l'état de santé lors de tests en pré-vol. La manière d'intégrer le Health-Monitoring aux tests déjà planifiés durant ces phases doit être étudiée, car le temps et l'espace mémoire disponible dans les unités de calcul sont comptés. Pour certains équipements critiques et très sollicités, il peut être intéressant de réaliser le suivi de l'état de santé de manière continue durant les vols, cela n'implique pas seulement l'équipementier et doit être pensé en amont du projet.

Enfin, nous avons développé ici la méthode de diagnostic et pronostic, une évolution logique est de déterminer la manière de traiter les informations issues de ces modules, notamment pour optimiser l'organisation de la maintenance.

Après étude de la diagnosticabilité et de la pronosticabilité d'un équipement, une évolution qui peut être intéressante est de proposer des retours sur la conception de l'équipement. Ces retours peuvent prendre la forme de suggestion de placement de capteurs, pour rendre l'équipement diagnosticable, ou d'ajout de pièces d'usure dont les lois de vieillissement sont connues, ou encore de sélection de composants avec des lois de vieillissement différentiables, pour rendre l'équipement pronosticable.

En plus de participer à organiser au mieux la maintenance, le pronostic peut également permettre de reconfigurer les missions ou l'équipement pour s'accomoder des défaillances pronostiquées. Cet aspect pourrait être étudié pour le moteur par exemple, en étudiant la possibilité de n'alimenter que deux phases du stator pour piloter le moteur en cas de détection d'initiation de court-circuit. Cela permettrait de ne pas aggraver la faute sur la phase court-circuitée. Plus généralement, ces études liées à la reconfiguration des missions ou des équipements offre des perspectives prometteuses.

Pour conclure sur une vision à plus long terme, la méthode développée est générique et pourrait être appliquée à des domaines industriels autres que l'aéronautique.





# Nomenclature

ABT (Accelerated Binary Tests) : essais accélérés binaires  
ADDT (Accelerated Destructive Degradation Tests) : essais accélérés à mesures de dégradation destructives  
ALT (Accelerated Life Tests) : essais de vie accélérés  
AMDE : Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets  
AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets, et de leurs Criticités  
ARMDT (Accelerated Repeated Measures Degradation Tests) : essais accélérés à mesures de dégradation répétées  
CBM (Condition Based Maintenance) : maintenance conditionnelle  
CDV : Commande De Vol  
DGA : Direction Générale de l'Armement  
DMC (Direct Maintening Cost) : coûts liés à la réparation et au remplacement  
EdP : Electronique de Puissance EHA (Electro Hydrostatic Actuator) : Actionneur Electro-Hydrostatique  
EMA (Electro Mechanical Actuator) : Actionneur Electromécanique  
EUL (End of Useful Life) : fin de vie utile FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) : voir AMDEC  
FH (Flight Hour) : heures de vol  
HM (Health Monitorinf) : Surveillance de la santé  
HMS (Health Monitoring System) : système de surveillance de la santé IEC (International Electrotechnical Commission) : commission internationale électrotechnique  
IFTB (In Flight Turn Back) : retour à la base de départ après le décollage  
IMDR : Institut de Maîtrise Des Risques industriels  
LCC (Life Cycle Cost) : coûts liés au cycle de vie  
LRM (Line Replaceable Module) Module remplaçable en ligne  
LRU (Line Replaceable Unit) : Unité remplaçable en ligne  
MBD : Messier Bugatti Dowty MPG (Moto-Pump Group) : Groupe Moto-Pompe  
MSAP : Machines Synchrones à Aimants Permanents MTBF (Mean Time Before Failure) : temps moyen avant la défaillance NRC (Non Recurring Costs) : coûts liés au développement et production unitaire  
PDF (Probabilité Density Function) : fonction de densité de probabilité PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machine) : Machines Synchrones à Aimants Permanents  
RC (Recurring Cost) : coûts récurrents  
RUL (Remaining Useful Life) : durée de vie utile restante  
SAE : Society of Automotive Engineers  
TRL (Technology Readiness Level) : niveau de maturité technologique



# 6 Annexes

## 6.1 Les lois de vieillissement

### 6.1.1 Les lois de vieillissement statistiques

Les lois de vieillissement statistiques sont les plus nombreuses dans la littérature. Plusieurs lois seront présentées ici.

**La loi Gaussienne** La loi de densité de probabilité peut être représentée par une loi Gaussienne ou une loi Normale :

$$f_d(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (6.1)$$

Cette loi est continue et symétrique et dépend de deux paramètres :  $\mu$  la médiane qui est aussi égale à la valeur moyenne, et  $\sigma^2$  la variance qui représente la dispersion autour de la moyenne. Le taux de défaillance est croissant avec le temps, cette loi représente bien la fin de vie des dispositifs subissant un phénomène de vieillissement progressif. Elle est symétrique autour de sa moyenne, et la croissance et la décroissance de part et d'autre de la moyenne sont exponentielles. On sait que lorsqu'une variable suit une loi Gaussienne, alors 95% des occurrences se font dans l'intervalle temporel  $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ , et 99.7% des occurrences se font dans l'intervalle temporel  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ , ce qui peut permettre de déterminer un intervalle temporel  $[t_{min}, t_{max}]$  qui contiendra l'instant de franchissement du seuil avec une probabilité très importante.

**La loi Lognormale** Une variable aléatoire continue positive est distribuée suivant une loi Lognormale si son logarithme népérien est distribué suivant une loi normale ou gaussienne. Elle est souvent représentative de la distribution de la mortalité, et des défaillances par fatigue en mécanique. Son paramètre de forme lui permet des représentations variées. Si  $X$  suit la loi lognormale, alors  $\ln(X)$  suit la loi normale de mêmes paramètres.

**La loi exponentielle** La loi exponentielle dépend d'un unique paramètre, le taux de défaillance constant. Elle est représentative de la durée de vie de matériel qui ont un taux de défaillance aléatoire constant [Aug98]. Elle s'applique donc de manière générale aux équipements qui subissent des défaillances brutales ou à des équipements complexes composés de plusieurs éléments dont les lois de fiabilité élémentaires sont différentes. Pour  $t$  positif, sa densité de probabilité est :

$$f(t, df^i) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (6.2)$$

où  $\lambda$  est le taux de défaillance. Cette loi est très utilisée pour représenter la durée de vie des circuits électroniques. Elle représente les lois sans usure (pannes non progressives mais abruptes) de la deuxième partie de la courbe baignoire (figure 1.10).



**La loi de Weibull** La loi de Weibull est une loi très souple représentative d'une grande variété de phénomènes aléatoires :

$$W(t, \beta, \eta, \gamma) = \beta/\eta((t - \gamma)/\eta)^{\beta-1} e^{-((t-\gamma)/\eta)^\beta} \quad (6.3)$$

où  $\eta$ , le paramètre d'échelle de la loi, est la durée de vie moyenne,  $\beta$ , le paramètre de forme, modifie la forme de la pdf, et  $\gamma$ , le paramètre d'origine des temps, représente la vie minimale. Les paramètres  $\eta$  et  $\beta$  sont liés à la durée de vie moyenne avant la faute (MTBF pour Mean Time Before Failure) de l'équipement. Quant à  $\gamma$ , il est nul si le vieillissement commence dès la mise en service. Lorsque  $\gamma$  est strictement positif, la probabilité de défaillance est nulle jusqu'à l'âge  $\gamma$ .

La loi de Weibull est souvent utilisée dans le domaine de la fiabilité des composants mécaniques et électroniques. En particulier elle généralise la loi exponentielle car elle peut modéliser un taux de défaillance variant dans le temps. Elle permet donc de représenter les trois phases de la durée de vie d'un matériel (période infantile, vie utile, période d'usure ou de vieillesse) via le réglage du paramètre de forme  $\beta$ . Si  $\beta < 1$ , le taux de défaillance diminue au cours du temps (mortalité infantile), si  $\beta = 1$  le taux de défaillance est constant (équivalent de la loi exponentielle), et enfin si  $\beta > 1$  le taux de défaillance augmente avec le temps (usure, vieillesse). Dans ce cas, suivant la valeur de  $\beta$  la loi de Weibull tend vers d'autres lois connues. Si  $\beta$  est compris entre 1.5 et 3.6 la loi de Weibull tend vers une loi log-normale. Si  $\beta \geq 3.5$ , c'est-à-dire avec un taux de défaillance augmentant beaucoup avec le dommage cumulé, la loi de Weibull tend vers la loi gaussienne. [Buf09] va même jusqu'à dire que  $\beta = 2$  correspond à des mécanismes de vieillissement de type corrosion ou fatigue, et  $\beta = 3.5$  correspond à un mécanisme d'usure (loi normale).

La figure 6.1 montre comment les paramètres  $\beta$ ,  $\gamma$ , et  $\eta$  permettent de modifier la forme de la courbe.

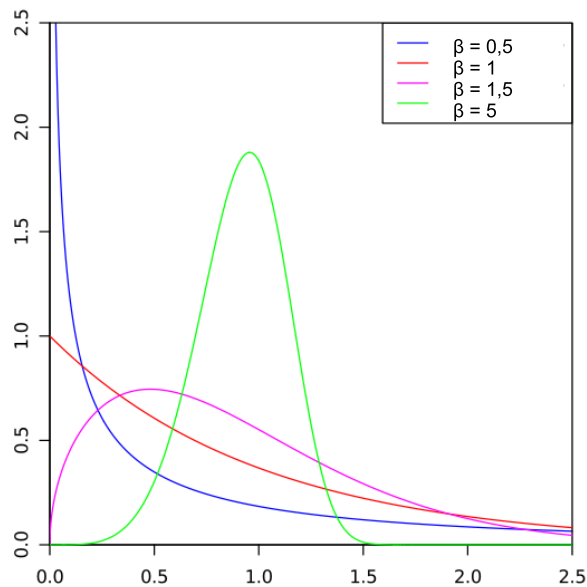


FIGURE 6.1 – Modifications de la forme de la courbe de Weibull en fonction de la valeur de son paramètre  $\beta$  (avec  $\gamma = 0$  et  $\eta = 1$ ), adaptée de [Wik13]

**La loi Gamma** La loi Gamma permet de représenter des processus d'évolution monotones. La fonction de densité de probabilité associée est de la forme :

$$f(t, \alpha, \beta) = t^{\alpha-1} \frac{(\beta^\alpha e^{-\beta t})}{\Gamma(\alpha)} \quad (6.4)$$

où  $\alpha$  est un paramètre de forme et  $\beta$  est un paramètre d'intensité. Comme la loi de Weibull, la loi Gamma peut représenter les trois phases de la vie d'un équipement, mais elle est plus simple car elle possède uniquement deux paramètres. Si  $\alpha = 1$ , cette distribution revient à une distribution exponentielle de paramètre  $\beta$ . Lorsque le paramètre  $\alpha$  est suffisamment grand, la distribution Gamma converge vers une loi gaussienne avec  $\mu = (\alpha - 1)/\theta$  et  $\sigma^2 = (\alpha - 1)/\theta^2$ . La loi Gamma est utilisée dans de nombreux domaines pour des pannes progressives : [vNKP00] a utilisé un modèle de dégradation basé sur la loi gamma pour représenter l'érosion d'une digue maritime au cours du temps, cette même loi a été utilisée par [Law04] pour représenter l'évolution de la taille d'une fissure dans un matériau, ou encore [FZA10] l'utilise pour modéliser la dégradation du fil de contact caténaire dans le temps. [LD09] dit que pour des systèmes soumis à des chocs intermittents sans évolution de la dégradation entre deux chocs consécutifs, le modèle Gamma est bien adapté. On pourrait la considérer pour les équipements utilisés peu de fois au cours d'un vol en considérant que les chocs correspondent aux périodes d'utilisation.

**La loi Birnbaum Saunders** La loi Birnbaum Saunders est présentée chez [Teb05] et convient aux défaillances de type propagation de fissure par fatigue. Sa densité de probabilité est :

$$f(t) = \frac{1}{2\sqrt{(2\pi)\alpha^2\beta t^2}} \frac{t^2 - \beta^2}{\sqrt{\frac{t}{\beta}} - \sqrt{\frac{\beta}{t}}} e^{-\frac{1}{2\alpha^2}(\frac{t}{\beta} - \frac{\beta}{t} - 2)} \quad (6.5)$$

avec  $t \geq 0$ ,  $\alpha \geq 0$ ,  $\beta \geq 0$ .

D'autres lois existent et sont référencées notamment chez [Aug98].

**La loi Beta** La loi Beta de type 1 dépend de deux paramètres de forme, elle représente la probabilité qu'un équipement survive au moins jusqu'à un temps  $t$  quand un certain nombre d'équipements sont testés simultanément. Elle est souvent utilisée en statistique bayésienne (survie d'un matériel) comme distribution à priori de la probabilité d'un évènement qui suit une distribution binomiale.

**La loi binomiale** La loi binomiale décrit un phénomène ayant des occurrences s'excluant mutuellement (par exemple dans notre cas défaillance ou fonctionnement), elle exprime la probabilité de voir  $k$  fois un phénomène au cours de  $n$  essais, en fonction de la probabilité  $p$  de ce phénomène. Le théorème Moivre-Laplace dit que la loi binomiale suit la loi de Gauss quand le nombre d'épreuves augmente, avec une moyenne  $\mu = kp$  et une variance  $\sigma^2 = kp(1 - p)$ .

**La loi de Poisson** La loi de Poisson est utilisée pour les évènements très peu probables. Si le nombre moyen d'occurrences dans l'intervalle de temps considéré est  $\lambda$ , alors la probabilité qu'il existe exactement  $k$  occurrences est :

$$p(k) = P(X = k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!} \quad (6.6)$$

La loi de Poisson tend vers la loi gaussienne de moyenne et d'écart type  $\lambda$  lorsque le nombre d'occurrences de faute dans la population est suffisamment importante ( $\lambda \geq 5$ ), ce qui est le cas dans le domaine de la fiabilité puisque l'on se base sur les grands nombres.

[HCBB12] combinent deux lois ce qui permet de modéliser à la fois la dégradation via une loi Gamma, et à la fois des pannes abruptes via un processus de Poisson. Pour représenter le fait que les pannes abruptes arrivent plus souvent lorsque la dégradation est à un stade avancé, l'intensité du processus de Poisson augmente avec le temps et avec le niveau de dégradation atteint (suivant si ce niveau est inférieur ou supérieur à un seuil fixé).

$$f_{\alpha(t-s),\beta}(u) = \frac{\beta^{\alpha(t-s)} \mu^{\alpha(t-s)-1} e^{-\beta u} 1_{u \geq 0}}{\Gamma(\alpha(t-s))} \quad (6.7)$$

où  $\alpha(t-s)$  est le paramètre de forme, et  $\beta$  est le paramètre d'échelle. Plus la dégradation est grande, plus le système est vulnérable aux chocs. Soit  $N_t$  le nombre de chocs dans l'intervalle temporel  $[0, t]$ , l'instant de choc est modélisé par le processus de Poisson non homogène

$$r(t, X_t) = r_1(t) 1_{X_t \leq M_s} + r_2(t) 1_{X_t \geq M_s} \quad (6.8)$$

avec  $r_1 \leq r_2$  des taux de pannes continu,  $X_t$  la valeur de la dégradation, et  $M_s$  le seuil de dégradation à partir duquel les conséquences des chocs sont plus importantes.

### 6.1.2 Les lois de vieillissement physiques

**Le modèle d'Arrhénius** Le modèle d'Arrhénius est une loi physique qui traduit l'influence du facteur d'endommagement température  $T$  sur la durée de vie  $L$  d'un circuit électronique ou d'un composant dont le processus de dégradation est chimique :

$$L = L_0 e^{-E_a/kT} \quad (6.9)$$

où  $E_a$  est l'énergie d'activation,  $k$  est la constante de Boltzmann égale à  $8.62 \cdot 10^{-5} eV/K$ ,  $L_0$  est le facteur d'échelle déterminé par expérimentation. [Ven07] l'utilise par exemple pour modéliser le vieillissement de condensateurs à électrolyte liquides par évaporation de l'électrolyte. On la retrouve également pour des composants de type di-électriques, semi-conducteur, batterie, lubrifiant et graisse, plastique et filaments de lampes incandescentes.

**Le modèle de puissance inverse** Le modèle de puissance inverse est une loi qui peut être physique, et qui traduit l'impact d'un facteur d'endommagement  $V$  sur la durée de vie  $L$  du composant (par exemple, effet de la tension sur une électronique) :

$$L = 1/(KV)^n \quad (6.10)$$

où  $n$  dépend du composant. On le retrouve pour des di-électriques, des roulements à billes ou rouleaux, des composants optoélectroniques, des composants mécaniques soumis à la fatigue.

Un cas particulier de ce modèle est la loi Coffin Manson qui donne le nombre de cycles moyens à la rupture de  $N$  pièces soumises à la fatigue connaissant des variations de température  $T$  ou des chocs thermiques  $\Delta T$  :

$$N(T) = \frac{A}{T^B} \quad (6.11)$$

$A$  et  $B$  sont des constantes caractéristiques du matériau.

**Le modèle d'Eyring généralisé** Le modèle d'Eyring généralisé améliore le modèle d'Arrhénius car il prend en compte d'autres facteurs d'endommagement que la température, comme la tension  $V$  ou n'importe quel autre stress :

$$L = \exp(A + B/T + CV + DV/T)/T \quad (6.12)$$

Il est basé sur la théorie physique (physique quantique), ce n'est pas un modèle empirique. On le retrouve par exemple pour modéliser le vieillissement de composants électroniques, de conducteurs aluminium, de composants mécaniques soumis à la rupture.

**La loi de Paris** La loi de Paris est citée dans de nombreux ouvrages dont [Pom10]. Elle représente l'évolution d'une fissure dite longue (supérieure à 1mm) en fonction du nombre de cycles :

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (6.13)$$

L'endommagement est la taille de la fissure  $a$ , le temps est représenté par le nombre de cycle  $N$ ,  $\Delta K$  représente la variation du facteur d'intensité de contrainte sur un cycle, donc le facteur d'endommagement global, et  $C$  et  $m$  sont des constantes dépendant du matériau (en principe ces deux paramètres sont déterminés expérimentalement sur la base d'essais de fatigue). Le dommage est  $\Delta a$  pendant un cycle  $\Delta N$ .

**La loi de Miner** La loi de Miner est utilisée pour modéliser l'accumulation linéaire des dommages dus à la fatigue. Elle est valide pour les métaux, seulement jusqu'à la limite d'élasticité. Sa forme est la suivante :

$$CD = \sum_{i=1}^k \frac{C_{S_i}}{N_i} \leq 1 \quad (6.14)$$

où  $CD$  est le dommage cumulé,  $C_{S_i}$  est le nombre de cycles appliqués avec le stress  $S_i$ ,  $N_i$  est le nombre de cycle avant la faute sous le stress  $S_i$  (obtenu des diagrammes S-N du matériau spécifique), et  $k$  est le nombre de charges appliquées.

Les principes de Miner permettent d'estimer l'endommagement d'un composant qui a des stress de valeurs différentes dans le temps. Le premier principe est le suivant : le dommage causé par une occurrence d'un évènement est mesuré par l'inverse  $1/N$  du nombre de fois  $N$  qu'il faut répéter cet évènement pour aller de l'état initial non endommagé à l'état de faute. Le second principe découle du premier et dit que le dommage causé par une succession d'évènements est la somme des dommages causés par chacun d'entre eux. D'où l'équation de Miner :

$$D = n_a/N_a \quad (6.15)$$

où  $n_a$  est le nombre d'occurrences de l'évènement  $a$  qui produit le dommage  $1/N_a$  et  $D$  est le dommage cumulé depuis l'instant initial. Au moment de la faute,  $D = 1$ . On a alors une mesure normalisée du dommage :

La question reste que Miner ne tient pas compte de la chronologie des évènements, donc l'étude n'est qu'approximative. En effet un évènement peut avoir des conséquences sur l'endommagement d'un système plus importantes s'il apparaît après d'autres évènements que s'il apparaît en tout début de vie du composant. Pour pallier à cela, il faut examiner les effets particuliers qui dépendent de la chronologie des évènements. Si les sollicitations sont connues à l'avance, les essais peuvent être faits en conséquence (on voit l'effet des évènements dans l'ordre où ils apparaissent).

**Les lois de modélisation des conséquences** Des lois de dégradation possibles sont représentées par le changement d'un paramètre, changement induit par la dégradation, comme c'est le cas chez [DG11]. Par exemple pour une valve, l'une des dégradation possibles est l'usure par glissement qui est modélisée par l'augmentation du coefficient de frottement.

$$\dot{r}(t) = \omega_r |F_f(t)v(t)| \quad (6.16)$$

où  $r$  est le coefficient de frottement,  $\omega_r$  est le coefficient d'usure,  $F_f$  est la force de frottement,  $v$  est la vitesse de la valve. De la même manière l'usure du ressort de la vanne est modélisé comme un changement de la constante de raideur. Les fuites d'air vers l'extérieur sont modélisées comme des aires correspondant à la taille de l'orifice :

$$\dot{A}(t) = \omega_i |F_f(t)v(t)| \quad (6.17)$$

avec  $\omega_i$  le coefficient d'usure et  $A$  l'aire de l'orifice de la fuite.

**La norme MIL-HDBK-217** La norme MIL-HDBK-217 est un documentaire militaire américain connu et accepté dans le monde entier, qui donne le calcul du taux de défaillance pour des composants tels que transistors, résistances... :

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_A \pi_E \pi_Q \dots \quad (6.18)$$

avec  $\lambda_b$  le taux de base calculé en fonction des contraintes principales (température, puissance...),  $\pi_Q$  est un facteur qualité du composant,  $\pi_E$  est un facteur contraintes d'environnement,  $\pi_A$  est un facteur contraintes appliquées...

**Loi Belvoir Research Development & Engineering** La loi Belvoir Research Development & Engineering permet d'évaluer par exemple le taux de défaillance  $df^i$  d'un joint :

$$df^i = \lambda_B Q_a / Q_f \quad (6.19)$$

où  $\lambda_B$  est le taux de défaillance de base du joint,  $Q_a$  et  $Q_f$  sont les fuites réelles et les fuites admissibles.  $Q_a/Q_f$  est décomposé en différents facteurs : pression du fluide, viscosité, température, dimensions, état de surface...

**Le modèle de Cox** Le modèle de Cox est principalement utilisé dans le domaine de la médecine et de la maintenance pour étudier l'influence de différentes variables intervenant dans le processus de dégradation sur différents sujets. L'expression mathématique de ce modèle se base sur la fonction de risque de défaillance  $h$  ([LD09]) :

$$h(t, v) = h_0(t) \Phi(\gamma_i, v_i) \quad (6.20)$$

où  $h_0(t)$  est le risque de défaillance de base, et  $\Phi$  une fonction qui fait intervenir les variables d'influence mesurées  $v_i$  pondérées par leurs paramètres  $\gamma_i$ . On peut introduire des termes d'interactions entre les facteurs d'endommagement  $v_i$ . Une hypothèse forte est faite : l'influence des contraintes sur le risque instantané de défaillance est indépendante du temps (c'est l'hypothèse de risque proportionnel). D'un point de vue mathématique, il est possible d'inclure des variables qui dépendent du temps, mais alors l'interprétation des coefficients est plus délicate. Le modèle de Cox est une loi physique où les variables d'influence seraient les facteurs d'endommagement, et l'évolution du risque de faute serait étroitement liée à l'évolution de l'endommagement.

### 6.1.3 Les lois de vieillissement à la fois statistiques et physiques

Dans [BLCL07] le taux de défaillance  $\lambda$  des systèmes mécaniques est décrit par une loi combinant une loi de Weibull (statistique) et un modèle de Cox (ayant une signification physique) :

$$\lambda(t, Z) = \lambda_0(t) \times g(Z) = \beta/\eta(t/\eta)^{\beta-1} \times \exp(B \cdot Z) \quad (6.21)$$

où  $\lambda_0$  est le taux de défaillance de base avec  $\beta$  le paramètre de forme et  $\eta$  le paramètre d'échelle, et  $g$  la correction de ce taux de base suivant le vecteur  $Z$  des facteurs d'endommagement avec  $B$  le vecteur des états des facteurs d'endommagement.

Dans leur revue [NLM<sup>+</sup>09] présentent un modèle général de dégradation qui correspond aux observations de dégradation par un modèle de régression avec des coefficients aléatoires. Il est de la forme

$$S(t_i) = \eta_i + \epsilon_i = \eta(t_i, \Phi, \Theta) + \epsilon_i \quad (6.22)$$

avec  $t_i$  le  $i^{me}$  instant de mesure (sur un total de  $n$  points de mesures),  $\epsilon_i$  est l'erreur de mesure qui suit la loi  $N(0, \sigma_{\epsilon}^2)$ ,  $\eta_i$  est la vraie valeur de dégradation à l'instant  $t_i$  (non mesurable).  $\eta$  dépend de  $\Phi$  le vecteurs de paramètres à effet fixe dans toute la population de composants, et de  $\Theta$  le vecteur de paramètres à effets aléatoires.  $\Theta$  est différent selon les individus de la population (ce peut être les variables environnementales, qui sont différentes suivant les composants).  $\Theta$  suit une distribution multivariée  $G_{\Theta}(\cdot)$ .

La fonction de répartition de  $T$ , instant où la dégradation dépasse le seuil  $D$ , est :

$$Pr(T \leq t) = F_T(t, \Phi, G_{\Theta}(\cdot), D, \eta) \quad (6.23)$$

Les paramètres de  $F_T$  sont obtenus à partir de données d'expérience.

Ce modèle est particulièrement développé chez [GEP09], qui propose de l'utiliser dans le cas où les connaissances préalables sur la dégradation ne sont pas disponibles (pas d'enregistrement d'évolution des signaux au cours du temps, seuls les instants de fin de vie sont connus). Il est appliqué sur des fautes de roulements à billes, le signal de dégradation étant basé sur les signaux vibratoires. Les auteurs considèrent deux formes possibles pour l'évolution de la dégradation : linéaire lorsque le dommage accumulé n'a pas d'effet sur la vitesse de dégradation (par exemple : usure de freins), ou exponentielle lorsque le dommage accumulé accélère voir décélère la vitesse de dégradation (exemple : roulements à billes). Dans le cas linéaire on a

$$S(t_i) = \Phi + \Theta t_i + \epsilon_i \quad (6.24)$$

Alors  $\Phi = 0$  car le dommage est considéré nul à l'instant  $t_i = 0$ . La forme de la distribution de  $\Theta$  est décidée par les experts, et ses paramètres sont évalués à l'instant  $t_{k+1}$  grâce aux  $k$  premières mesures de dégradation. La valeur finale  $T$  est déduite via  $S(T + t_k) = D$ . Dans le cas exponentiel la loi est de la forme :

$$S(t_i) = \Phi e^{\Theta t_i + \epsilon_i - \sigma^2/2} \quad (6.25)$$

Alors en posant  $L_i = \ln(S(t_i))$  on a

$$L_i = \Phi' + \Theta_i + \epsilon_i \quad (6.26)$$

et l'on se rapporte au modèle linéaire précédent.

Enfin un dernier exemple peut être trouvé chez [BRG02], qui combine les méthodes physiques et statistiques pour prédire le RUL d'une dent d'engrenage. Le modèle calcule la contrainte dans la dent, et une simulation génère une distribution de l'initiation de la fissure en fonction des propriétés mécaniques et des conditions opérationnelles. La loi non linéaire de Miner calcule le dommage cumulé par les cycles de fatigue. La loi de Paris modélise la propagation de la fissure.

Une synthèse des différentes lois de vieillissement est présentée dans le tableau 6.1.

Loi de vieillissement	Facteurs d'endommagement	Abrupt - progressif	Forme de la sortie	Physique ou statistique	Nombre de paramètres	Application
<b>Weibull</b>	Un ou plusieurs, constants	Abrupt ou progressif	Durée de vie	Statistique	3 : moyenne, forme, minimum	Les trois phases de la courbe en baignoire suivant la valeur du paramètre de forme
<b>Gamma</b>	Un ou plusieurs, constants	Abrupt ou progressif	Durée de vie	Statistique	2 : forme, intensité	Erosion, usure, évolution de la taille d'une fissure
<b>Birnbaum Sanders</b>	Un ou plusieurs, constants	Progressif	Durée de vie	Statistique	2	Propagation de fissure par fatigue
<b>Loi binomiale</b>	Un ou plusieurs, constants	Abrupt	Probabilité de survie	Statistique	1 : probabilité	Application
<b>Beta de type 1</b>	Un ou plusieurs, constants	Abrupt	Probabilité de survie	Statistique	2 : forme	Distribution à priori de la probabilité d'un évènement qui suit une distribution binomiale
<b>Poisson</b>	Un ou plusieurs, constants	Abrupt	Probabilité de survie	Statistique	1 : intensité	Evènements très peu probables
<b>Poisson + Gamma</b>	Un ou plusieurs, constants	Abrupt et progressif	Durée de vie ou évolution de l'endommagement	Statistique	3 : moyenne, dispersion, intensité	Usure combinée à des fautes abruptes (chocs, coups, phénomènes aléatoires, qui augmentent la vitesse de dégradation)

TABLE 6.1 – Synthèse des lois de vieillissement et leurs applications



Loi de vieillissement	Facteurs d'endommagement	Abrupt - progressif	Forme de la sortie	Physique ou statistique	Nombre de paramètres	Application
<b>Paris</b>	Un seul, variable	Progressif	Evolution de l'endommagement	Physique	5 : 2 matériaux, 1 contrainte, 1 endommagement, 1 temporel	Evolution de la taille d'une fissure
<b>Arrhénius</b>	Un seul, variable	Progressif	Durée de vie	Physique	4 : 1 durée de vie initiale, 2 constantes, 1 stress	Influence de la température sur un circuit électronique ou un composant chimique
<b>Puissance inverse</b>	Un seul, variable	Progressif	Durée de vie	Physique	3 : 2 constantes, 1 stress	Effet de la tension sur une électronique
<b>Coffin Manson</b>	Un seul, variable	Progressif	Durée de vie ou évolution de l'endommagement	Physique	3 : 2 constantes, 1 stress	Fatigue de pièces soumises à la température
<b>Eyring</b>	Plusieurs, variables	Progressif	Durée de vie	Physique	6 : 4 constantes, 2 stress	Composants électroniques, conducteurs aluminium, composants mécaniques soumis à la rupture...
<b>Miner</b>	Un seul, variable	Progressif	Evolution de l'endommagement	Physique		Accumulation linéaire des dommages dus à la fatigue
<b>Cox</b>	Plusieurs, variables	Progressif	Probabilité de survie	Physique	1 fiabilité initiale, n stress, m constantes	Mécanique

TABLE 6.2 – Synthèse des lois de vieillissement et leurs applications

Loi de vieillissement	Facteurs d'endommagement	Abrupt - progressif	Forme de la sortie	Physique ou statistique	Nombre de paramètres	Application
<b>MIL-HDBK-217</b>	Plusieurs, constants	Les deux	Taux de défaillance	Statistique	1 taux de défaillance initial, n stress	Transistors, résistances...
<b>Belvoir RDE</b>	Plusieurs, constants	Les deux	Taux de défaillance	Statistique	3 : 1 taux de défaillance initial, 2 constantes	Joints
<b>Weibull + Cox</b>	Plusieurs, variables	Progressif	Taux de défaillance	Physique et statistique	3 paramètres statistiques (formant un taux de défaillance initial), n stress, m constantes	Mécanique

TABLE 6.3 – Synthèse des lois de vieillissement et leurs applications

## 6.2 Les essais : une aide à la conception des modèles pour le Health Monitoring

### 6.2.1 Les essais pour le diagnostic

Deux types d'essais sont toujours réalisés sur les équipements. Tout d'abord il y a les essais de développement (ou engineering). Ils servent à creuser certains aspects pour être sûr que l'équipement fonctionne comme prévu, et sont réalisés tant que la conception de l'équipement n'est pas figée. Lorsque la conception est figée, on passe aux essais de qualification. Ils servent à démontrer que les exigences de spécification sont bien satisfaites.

Les essais de qualification peuvent servir au diagnostic, notamment pour perfectionner le modèle de comportement nominal.

Ensuite des fautes peuvent être incluses dans l'équipement, de manière forcée ou en le faisant vieillir (voir le paragraphe suivant pour les essais de vieillissement), afin d'étudier le comportement de l'équipement en faute, ce qui permet d'établir ou de recalculer les modèles de faute. En dehors du diagnostic, ils peuvent également être utilisés pour vérifier la tolérance aux fautes.

### 6.2.2 Les essais pour le pronostic

Les essais de vie du système ont pour but de déterminer une variable caractéristique de la fiabilité du système. Lorsque les essais de vie ne peuvent pas être réalisés à cause de la longue durée de vie du système, on peut procéder à des essais de vie accélérés, qui sont des essais de vie dans lesquels les systèmes sont testés avec des conditions de travail plus sévères afin d'accélérer le processus de dégradation et de vieillissement du système. Ces essais accélérés permettent d'établir des lois de vieillissement, dont les paramètres sont calculés à partir d'une régression linéaire avec les données obtenues.

#### 6.2.2.1 Principe des essais de vie accélérés

Les essais de vie accélérés permettent de certifier les équipements et de détecter les modes de faute pour pouvoir les corriger. Le principal but de ces essais est d'obtenir des informations sur la fiabilité des équipements, sans avoir besoin de les laisser vivre une vie entière. Les résultats sont utilisés pour prédire la durée de vie des équipements en condition normale. L'extrapolation entre la durée de vie en condition accélérée et la durée de vie normale est justifiée par l'emploi de modèles physiques ou empiriques. Ces essais sont présentés en détail dans [Cen04] ou encore [Teb05].

Il existe plusieurs moyens pour accélérer les essais :

- augmenter le taux d'utilisation de l'équipement, pour les équipements qui ne sont pas utilisés en continu. La fréquence des essais ne doit cependant pas affecter le nombre de pannes par cycles : il faut retourner à l'état initial entre deux essais (par exemple refroidissement de l'équipement) ;
- augmenter la vitesse de vieillissement de l'équipement (en augmentant des paramètres comme la température ou l'humidité, certains mécanismes de dégradation, notamment chimiques, sont accélérés) ;

- augmenter le niveau de stress à travers les contraintes d'origine :
  - climatiques : température, humidité ;
  - électriques : cycles ON-OFF, surtension, intensité de courant ;
  - mécaniques : chargement mécanique (torsion/flexion), chocs mécaniques, vibrations ;
  - autres, spécifiques aux produits, par exemple pour des produits électroniques on trouve les décharges électrostatiques les champs magnétiques/électriques, et le rayonnement.
- augmenter à la fois la vitesse de vieillissement et le niveau de stress.

### 6.2.2.2 Les différents types d'essais accélérés

Il y a différents types d'essais accélérés. On trouve les essais aggravés ou hautement accélérés (HALT). Le principe de ce type d'essais consiste à appliquer au produit des contraintes variables (échelonnées, progressives, cycliques, voire aléatoires), pouvant aller au-delà des limites technologiques, jusqu'à l'apparition d'une défaillance. Ensuite des analyses technologiques et correctives de cette défaillance sont effectuées. L'essai aggravé permet d'obtenir les limites inhérentes aux technologies utilisées, de mettre en évidence des défaillances en dehors des spécifications, d'apporter des corrections au produit en phase de conception, d'obtenir un produit stabilisé et mature dès les premiers exemplaires du produit dans des délais réduits, et de présenter en qualification un produit de robustesse améliorée. Les essais aggravés ne s'appuient sur aucun modèle analytique, ils ont pour objectif essentiel de favoriser la robustesse d'un produit par l'exploration de ses marges fonctionnelles, et non pas d'estimer la fiabilité de ce produit dans des conditions normales d'utilisation.

Les essais dédiés à l'étude de la fiabilité seraient plutôt des essais de vie accélérés ou ALT. Contrairement aux essais aggravés, les niveaux de contraintes appliquées dans les essais accélérés doivent rester inférieurs aux valeurs limites technologiques. Les essais aggravés donnent des résultats qualitatifs, non exploitables en fiabilité, tandis que les essais accélérés donnent des résultats quantitatifs.

Le principe est le suivant. Une population d'équipements est soumise à des essais accélérés en banc d'essai. L'application des contraintes est le plus souvent constante, avec un niveau de stress spécifique par groupe d'unités testé. Un plus grand nombre d'essais entraîne une meilleure précision dans la connaissance du vieillissement. Ensuite les données obtenues par ces essais sont traitées statistiquement afin de caractériser la fiabilité du système en estimant des fonctions de distribution liées à la durée de vie ou à l'évolution de la dégradation. Les essais sont divisés en catégories suivant les données obtenues en sortie :

- les essais accélérés binaires (ABT pour Accelerated Binary Test) donnent une réponse binaire en sortie, on sait seulement si l'équipement a eu une panne, ou non, durant l'essai ;
- les essais de vie accélérés (ALT pour Accelerated Life Tests) donnent les durées de vie de chaque échantillon testé ;
- les essais accélérés à mesures de dégradation répétées (ARMDT pour Accelerated Repeated Measures Degradation Tests) donnent les mesures du niveau de dégradation de chaque échantillon à différents instants. Il peut s'agir de dégradation physique, ou de dégradation de la performance ;
- les essais accélérés à mesures de dégradation destructives (ADDT pour Accelerated Destructive Degradation tests) donnent, de la même manière que pour les ARMDT, des mesures du niveau de dégradation de chaque échantillon à différents instants. Mais ici la mesure de dégradation

est destructive, donc on n'aura qu'une seule mesure par échantillon. Un plus grand nombre d'échantillons est nécessaire ;

Le choix entre ces différents essais est un compromis entre la sortie souhaitée et les essais qu'il est envisageable d'effectuer.

Entre plusieurs niveaux de contraintes testés en essai, les résultats peuvent être interpolés. La forme de la loi de vieillissement ou loi de fiabilité dépendra ensuite des essais réalisés. Le tableau 6.4 synthétise l'ensemble des types d'essais accélérés, et permet de choisir l'essai à réaliser en fonction de la forme de la sortie souhaitée.

<b>Entrée : résultats d'essais accélérés</b>	<b>Sortie : forme de la loi de vieillissement</b>
Essais accélérés binaires	Probabilité de survie à un instant défini
Essais de vie accélérés	Loi statistique autour de la fin de vie utile fonction du stress
Essais accélérés à mesures de dégradation répétées	Loi statistique concernant l'évolution de l'endommagement au cours du temps
Essais accélérés à mesures de dégradation destructives	Loi statistique concernant l'évolution de l'endommagement au cours du temps

TABLE 6.4 – Données d'entrée et de sortie aux modèles statistiques de fiabilité

### 6.2.2.3 Les modèles d'accélération

Le principe des essais accélérés est donc de réaliser des essais sur les équipements sous des contraintes supérieures à ce qu'ils subiront durant leur vie opérationnelle pour en déduire les premiers modes de faute et les premières défaillances. On cherche à obtenir des lois de fiabilité, puis à les adapter pour le cas où l'équipement est soumis à ses contraintes usuelles grâce à des modèles d'accélération (voir la figure 6.2). Ainsi, on peut définir un Facteur d'Accélération  $FA$  entre la durée de vie  $t_1$  de l'équipement dans des conditions nominales et la durée de vie  $t_2$  de l'équipement dans des conditions agressives :  $FA = t_1/t_2$ .

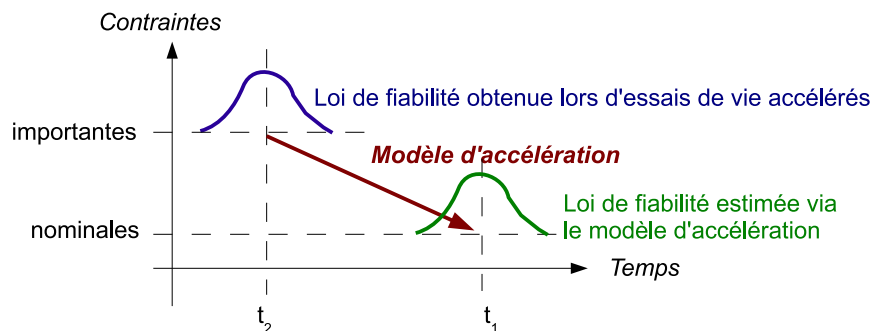


FIGURE 6.2 – Utilisation du modèle d'accélération pour déterminer la loi de fiabilité en condition nominale à partir de la loi de fiabilité obtenue grâce à des essais de vie accélérés

Une revue complète des modèles d'accélération est réalisée par [EM06]. On trouve :

- les modèles physiques, qui nécessitent une très bonne connaissance du processus de dégradation ;
- les modèles empiriques, qui sont une bonne alternative aux modèles physiques lorsque les informations sur le processus de dégradation sont insuffisantes ;

Les modèles peuvent être statistiques ou non.

L'une des méthodes les plus utilisées dans les essais accélérés est l'utilisation de la température pour accélérer les mécanismes de panne. Dans ce cas les facteurs d'accélération connus sont :

- le facteur d'accélération d'Arrhenius :  $AF_{Ar}(T, T_u, E_a) = R(T)/R(T_u) = \exp\left(\frac{E_a * 11605}{K} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T}\right)\right)$  où  $T_u$  est la température d'utilisation et  $T$  est la température d'essai ( $T > T_u$ ) ;
- le facteur d'accélération d'Eyring :  $AF_{Ey}(T, T_u, E_a) = \left(\frac{TK}{T_u K}\right)^m AF_{Ar}(T, T_u, E_a)$  ;
- le facteur d'accélération basé sur Coffin Manson, qui est bien adapté pour les cycles de température :  $AF(\Delta T) = \frac{\Delta T}{\Delta T_u}^\beta$ .

Lorsque l'accélération est liée à la tension, on utilise le plus souvent le facteur d'accélération lié à la relation de puissance inverse (qui peut également être utilisée avec des variables d'accélération telles que la pression, le courant électrique, l'humidité, etc.) :  $AF(V) = \left(\frac{V}{V_u}\right)^\beta$ .

Enfin lorsque l'on a plusieurs variables d'accélération, le facteur d'accélération lié à la loi d'Eyring généralisée peut être utilisé :  $AF(T, X) = \frac{R(T, X)}{R(T_u, X_u)}$  où  $R(T, X) = \gamma_0 \times (TK)^m \exp\left(-\frac{\gamma_1}{kTK}\right)$  avec  $X$  une variable d'accélération non thermique (par exemple mécanique ou électrique).

#### 6.2.2.4 Réalisation des essais accélérés

Pour que les essais de vie accélérés soient représentatifs, il s'agit de bien s'assurer que les hypothèses suivantes sont respectées :

- les essais accélérés doivent générer le même mécanisme de panne que lors de la vie opérationnelle de l'équipement. Autrement dit, les mécanismes de défaillances provoqués en conditions accélérées doivent être représentatifs des conditions normales d'emploi ;
- les variables d'accélération doivent être bien choisies. Les contraintes augmentées devront notamment être celles qui conduisent à la même défaillance majeure que celle constatée en fonctionnement réel ;
- il faut minimiser la quantité d'extrapolation nécessaire : on évitera de trop augmenter la valeur usuelle des variables d'endommagement ;
- la distribution des durées de vie en conditions accélérées devra avoir la même forme que celle constatée en conditions normales (même loi de fiabilité mais des paramètres d'échelles différents).

La préparation, la planification, et l'exploitation des essais de vie accélérés se déroulent avec les actions suivantes :

- acquérir une bonne connaissance de l'équipement et de son environnement d'utilisation, déterminer les contraintes environnementales auxquelles l'équipement sera exposé durant sa vie opérationnelle, et durant ses temps de stockage ;
- identifier et énumérer les modes de panne possible, grâce notamment à l'avis d'experts. Il faut bien connaître les modes de panne et leurs natures. Par exemple les pannes dites " électriques " sont en réalité souvent de nature chimique ou mécanique. Les phénomènes d'interactions doivent être pris en compte ;
- identifier les variables d'accélération qui peuvent être utilisées pour accélérer ces mécanismes

de panne ;

- déterminer la forme du modèle d'accélération : la relation mathématique entre le taux de panne ou la vitesse de dégradation et l'amplitude des sollicitations appliquées. L'expérience montre qu'un modèle simple avec peu de paramètres est préférable à un modèle multi-paramètres ;
- estimer la valeur des paramètres intervenant dans ce modèle d'accélération ;
- planifier les essais : choix des contraintes à appliquer et de leurs niveaux (les niveaux de contraintes doivent rester inférieurs aux valeurs limites technologiques), nombre d'échantillons à tester ;
- réaliser les essais en enregistrant toutes les variables pertinentes ;
- analyser les données, identifier des variables qui reflètent la variabilité dans le mécanisme de panne, et développer des modèles statistiques de vieillissement (distribution de probabilité de l'instant de panne ou de l'évolution de la dégradation).

Lors de la préparation des essais, un plan d'expérience permet d'optimiser le nombre d'essais. Plus le nombre de stress de natures différentes est important, plus le nombre d'essais est important. Par exemple pour 3 stress de nature différente pouvant prendre 2 valeurs différentes,  $2^3$  essais seront nécessaires si l'on veut faire une fois chaque cas possible. On peut également décider que les stress de nature différente interagissent ou non.

### 6.3 Liste des paramètres du modèle de l'EHA

Parmi les paramètres de l'EHA il y a des paramètres à dynamique rapide (communément appelés les variables) et des paramètres à dynamique lente (communément appelés les constantes, mais dont les variations nous permettent de représenter les dégradations progressives de l'équipement).

Les paramètres à dynamique rapide sont les suivants :

- les paramètres de l'EdP
  - $\alpha_m$  (%) : le signal de commande de l'EdP
  - $U_{bus}$  : valeur de la source de tension continue
- les paramètres partagés par l'EdP et le moteur
  - $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  (V) : tensions d'alimentation phase-phase du moteur
- les paramètres du moteur
  - $\omega$  (rad/s) : vitesse électrique des tensions et courants
  - $C_r$  (Nm) : couple appliqué par l'arbre moteur sur le rotor
  - $E_a, E_b, E_c$  (V) : tensions induites dans les enroulements par le champ du rotor
  - $I_a, I_b, I_c$  (A) : courants de phase
  - Les paramètres liés au modèle géométrique de la MSAP
    - $\alpha$  (rad) : dimension angulaire d'une dent
    - $\beta$  (rad) : dimension angulaire d'une encoche
    - $\gamma$  (rad) : dimension angulaire d'un aimant
    - $\delta$  (rad) : dimension angulaire de l'espace inter-aimants
    - $\phi_{00}$  (Wb) : flux magnétique produit par l'aimant  $M_0$  dans la dent  $T_0$
    - $B_{max}$  (T) : valeur maximale du champ magnétique créé par un aimant
    - $d$  ( $m^2$ ) : diamètre du rotor
    - $l$  (m) : longueur des aimants
    - $M_i$  : les aimants
    - $S_{00}$  : surface de l'aimant  $M_0$  en face de la dent  $T_0$

- $T_j$  : les dents
- les paramètres partagés par la pompe et le moteur
  - $\Omega_a$  (rad/s) : vitesse de rotation de l'arbre par rapport au corps
  - $\theta_a$  (rad) : position angulaire de l'arbre moteur par rapport au corps
  - $C_a$  (Nm) : couple exercé par l'arbre de la pompe sur l'arbre du moteur
- les paramètres de la pompe
  - $\theta_i$  (rad) : position angulaire courante du piston par rapport à l'origine
  - $\theta_b$  (rad) : position angulaire du barillet par rapport au corps
  - $C_u$  (Nm) : couple exercé par les biellettes sur l'arbre de la pompe
  - $C_p$  (Nm) : couple exercé par le barillet sur l'arbre de la pompe
  - $F$  (N) : force exercée par le ressort et par les paliers hydrodynamiques sur le barillet
  - $F_i$  (N) : force exercée par le piston sur la biellette
  - $P_i$  (Pa) : pression du fluide dans le puit de barillet du piston  $i$
  - $P_R$  (Pa) : pression du fluide au niveau du drain
  - $Q_{Ai}$  ( $m^3/s$ ) : débit du puit de barillet associé au piston  $i$  vers le port A via la distribution
  - $Q_{Bi}$  ( $m^3/s$ ) : débit du puit de barillet associé au piston  $i$  vers le port B via la distribution
  - $Q_{Ri}$  ( $m^3/s$ ) : débit du puit de barillet associé au piston  $i$  vers le drain
  - $Q_R$  ( $m^3/s$ ) : débit total de fluide vers le drain
  - $V$  (m/s) : vitesse de translation du barillet par rapport au corps
  - $V_v$  (m/s) : vitesse de déplacement linéaire du piston du vérin
  - $V_i$  (m/s) : vitesse linéaire du piston par rapport au barillet
  - $X_i$  (m) : position du piston par rapport au barillet
- les paramètres partagés par la pompe et le vérin
  - $P_A$  (Pa) : pression du fluide au niveau du port A de la pompe
  - $P_B$  (Pa) : pression du fluide au niveau du port B de la pompe
  - $Q_A$  ( $m^3/s$ ) : débit total de fluide vers le port A
  - $Q_B$  ( $m^3/s$ ) : débit total de fluide vers le port B
- les paramètres du vérin
  - $F_v$  (N) : force exercée par la charge sur le piston du vérin
  - $X_V$  (m) : position de la tige du vérin par rapport à l'origine

Les paramètres à dynamique lente sont les suivants :

- les paramètres du moteur
  - $J$  : moment d'inertie de la partie mobile du moteur
  - $K_e$  (V/(rad/s)) : constante électro-magnétique caractéristique des aimants du rotor
  - $K_f$  : coefficient de frottement visqueux équivalent entre le stator et le rotor du moteur
  - $L_a, L_b, L_c$  (H) : inductances des trois enroulements
  - $R_a, R_b, R_c$  ( $\Omega$ ) : résistances des trois enroulements
  - $Z_a, Z_b, Z_c$  : impédances complexes des phases a, b, c du moteur
- les paramètres de la pompe
  - $\rho$  ( $kg/m^3$ ) : masse volumique du fluide
  - $\mu$  (Pa.s) : viscosité dynamique du fluide
  - $\nu$  : viscosité cinématique du fluide
  - $\alpha$  (rad) : angle de l'axe brisé de la pompe
  - $\phi_i$  (rad) : position angulaire du piston par rapport au piston arbitrairement choisi comme étant à l'origine (c'est-à-dire tel que  $\phi_1 = 0$ )
  - $\theta_{min}$  (rad) : position angulaire pour laquelle le piston entre en contact avec la lunule
  - $\theta_{max}$  (rad) : position angulaire limite pour laquelle le piston n'est plus en contact avec la



lunule

- $A_O$  ( $m^2$ ) : aire de l'orifice de décharge du puit de barillet
- $A_p$  ( $m^2$ ) : aire du piston
- $A_t$  ( $m^2$ ) : aire de la tige (rod dans le composant piston de Amesim)
- $B$  (Pa) : module de compressibilité du fluide
- $Cq(-)$  : coefficient de débit représentatif de la forme de la restriction au niveau lunule/port
- $c_{ri}$  (m) : jeu diamétral entre le piston  $i$  et le puit de barillet
- $C_v$  : coefficient de frottement visqueux entre le corps de vérin et le piston du vérin
- $dra$  (m) : diamètre de répartition des grains des biellettes sur l'arbre
- $d_p$  (m) : diamètre du piston
- $d_0$  (m) : diamètre de l'orifice de décharge équivalent (entre le piston et le puit de barillet)
- $dt$  (degrès) : secteur angulaire de la lunule
- $j_g(m)$  : hauteur du jeu entre la glace de distribution et le barillet
- $k$  (N/m) : raideur du ressort
- $l_c$  (m) : course du piston
- $m$  (kg) : masse du barillet
- $R_{g1}$  (m) : rayon intérieur de la glace
- $R_{g2}$  (m) : rayon intérieur de la lunule
- $R_{g3}$  (m) : rayon extérieur de la lunule
- $R_{g4}$  (m) : rayon extérieur de la glace
- $S_v$  : surface du piston du vérin
- $Vol_0$  ( $m^3$ ) : volume mort de la chambre : volume dans le puit de barillet lorsque le piston est au point mort haut
- $Vol_A(m^3)$  : volume disponible pour le fluide au niveau de la lunule et du port A
- $Vol_B(m^3)$  : volume disponible pour le fluide au niveau de la lunule et du port B
- les paramètres du vérin
  - $M_{tige}$  (kg) : masse de la tige du vérin
  - $V_A(m^3)$  : volume de la chambre A du vérin
  - $V_B(m^3)$  : volume de la chambre B du vérin
  - $V_{A0}(m^3)$  : volume de la chambre A du vérin lorsque sa position est l'origine
  - $V_{B0}(m^3)$  : volume de la chambre B du vérin lorsque sa position est l'origine

Les paramètres sont ici exprimés en unité SI pour les calculs, dans la suite du document ils pourront parfois être exprimés en unité métier pour donner un ordre de grandeur et critiquer les résultats.

## 6.4 Calcul de la puissance thermique à dissiper en cas de court-circuit statorique

Le schéma du moteur est le suivant en présence d'un court-circuit (figure 6.3).

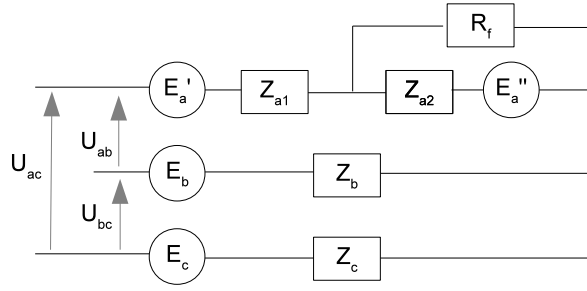


FIGURE 6.3 – schéma du moteur en présence d'un court-circuit statorique

Avec pour les tensions :

$$\left\{ \begin{array}{l} U \text{ (constante, imposée par le hacheur)} \\ U_{ab} = U.e^{i\omega t} \\ U_{bc} = U.e^{i\omega t + 2\pi/3} \\ U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} \\ E \text{ (constante, imposée par la vitesse de rotation du moteur, donc par } U) \\ E_a = E.e^{i\omega t} \text{ avec } E'_a = (1 - S_a).E_a \text{ avec } E''_a = S_a.E_a \\ E_b = E.e^{i(\omega t + 2\pi/3)} \\ E_c = E.e^{i(\omega t + 4\pi/3)} \end{array} \right.$$

et pour les impédances :

$$\left\{ \begin{array}{ll} Z_{a1} = (1 - S_a)R_a & + i[(1 - S_a)^2 - M_a] * L_a\omega \quad (M_a \text{ mutuelle inductance des deux parties de la bobine)} \\ Z_{a2} = S_a R_a & + i[S_a^2 - M_a] * L_a\omega \\ Z_b = R_b & + i[L_b\omega] \\ Z_c = R_c & + i[L_c\omega] \end{array} \right.$$

Pour simplifier l'écriture et sans réelle perte de précision, nous considérons que les impédances des trois phases ont des valeurs identiques (en l'absence de court circuit) :

$$\begin{aligned} R_a &= R_b = R_c = R \\ L_a &= L_b = L_c = L \\ Z_a &= Z_b = Z_c = Z \end{aligned}$$

Passons par le théorème de superposition pour déterminer les courants dans la phase A.

1.  $E'_a = 0, E_b = 0, E_c = 0, U_{xy} = 0$  le circuit global devient donc

Une seule source de tension ici. On peut calculer le courant dans l'impédance  $Z_{a2}$  en écrivant :

$$I_{cc}Z_{a2}(R_f) = -\frac{E''_a}{[Z_{a2} + R_f // (Z_{a1} + (Z_b // Z_c))]} = -\frac{E''_a}{Z_{a2} + (R_f // Z_{abc})}$$

Là encore, l'expression analytique détaillée n'a pas d'intérêt, mais cette expression permet une résolution numérique sans difficulté.

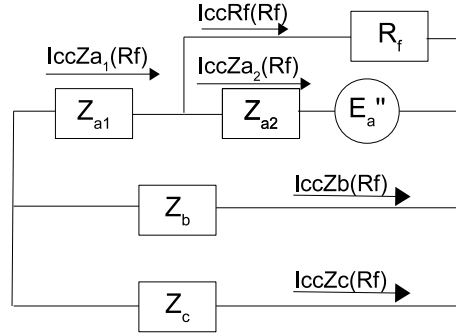


FIGURE 6.4 – effet la source de tension de la boucle de court-circuit

Il est alors possible de déterminer le courant dans la résistance  $R_f$  :

$$R_f * I_{cc}(R_f) + I_{cc}Z_{a1} * Z_{abc}$$

D'où

$$I_{cc}(R_f) = -I_{cc}Z_{a2}(R_f) * \frac{Z_{abc}}{Z_{abc} + R_f}$$

les courants dans les cinq impédances sont donc :

$$\begin{cases} I_{cc}Z_{a2}(R_f) &= -\frac{E_a''}{Z_{a2} + (R_f // Z_{abc})} \\ I_{cc}(R_f) &= -I_{cc}Z_{a2}(R_f) * \frac{Z_{abc}}{Z_{abc} + R_f} \\ I_{cc}Z_{a1}(R_f) &= I_{cc}Z_{a2}(R_f) + I_{cc}(R_f) \\ I_{cc}Z_b(R_f) &= -\frac{I_{cc}Z_{a1}(R_f)}{2} \\ I_{cc}Z_c(R_f) &= -\frac{I_{cc}Z_{a1}(R_f)}{2} \end{cases}$$

2.  $E_a'' = 0$  le circuit global devient donc

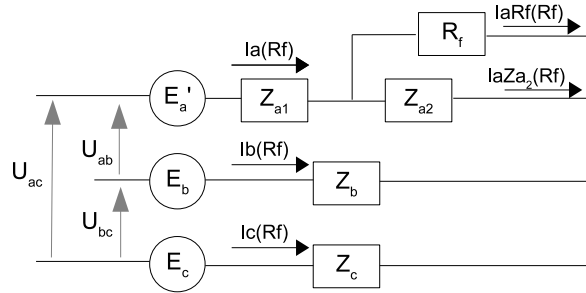


FIGURE 6.5 – Sans la source de tension de la boucle de court-circuit

Notons  $Z_a(R_f)$  l'impédance de la branche correspondant à la phase A.

$$Z_a(R_f) = Z_{a1} + \frac{Z_{a2} * R_f}{Z_{a2} + R_f}$$

Les lois des mailles et des nœuds permettent d'écrire :

$$\begin{cases} -E_a' & -Z_a(R_f)I_a(R_f) & +Z_bI_b(R_f) & +E_b & +U_{ab} & = 0 & (1) \\ -E_a' & -Z_a(R_f)I_a(R_f) & +Z_cI_c(R_f) & +E_c & +U_{ac} & = 0 & (2) \\ -E_b & -Z_bI_b(R_f) & +Z_cI_c(R_f) & +E_c & +U_{bc} & = 0 & (3) \\ I_a(R_f) & +I_b(R_f) & +I_c(R_f) & & & = 0 & (4) \end{cases}$$

d'où :

$$(1) \rightarrow I_b(R_f) = \frac{E'_a - E_b - U_{ab} + Z_a(R_f) \cdot I_a(R_f)}{Z_b} \quad (5)$$

$$(2) \rightarrow I_c(R_f) = \frac{E'_a - E_c - U_{ac} + Z_a(R_f) \cdot I_a(R_f)}{Z_c} \quad (6)$$

puis

$$(4) + (5) + (6) \rightarrow I_a(R_f) + \frac{E'_a - E_b - U_{ab} + Z_a(R_f) \cdot I_a(R_f)}{Z_b} I_a(R_f) + \frac{E'_a - E_c - U_{ac} + Z_a(R_f) \cdot I_a(R_f)}{Z_c} I_a(R_f) = 0$$

et enfin (avec  $Z_b = Z_c = Z$ )

$$I_a(R_f) = \frac{U_{ab} + U_{ac} + E_b + E_c - 2E'_a}{Z + 2Z_a(R_f)} \quad (7)$$

Les équations (5),(6) et (7) permettent donc de calculer numériquement les courant dans toutes les impédances du circuit triphasé du stator du moteur.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_a(R_f) = \frac{U_{ab} + U_{ac} + E_b + E_c - 2E'_a}{Z + 2Z_a(R_f)} \\ I_b(R_f) = \frac{E'_a - E_b - U_{ab} + Z_a(R_f) \cdot I_a(R_f)}{Z_b} \\ I_c(R_f) = \frac{E'_a - E_c - U_{ac} + Z_a(R_f) \cdot I_a(R_f)}{Z_c} \\ I_a R_f(R_f) = I_a(R_f) * \frac{Z_{a2}}{Z_{a2} + R_f} \\ I_a Z_{a2}(R_f) = I_a(R_f) - I_a R_f(R_f) \end{array} \right.$$

Les courants dans les cinq impédances résultent de la somme des deux groupes d'équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} ITotalZ_{a1}(R_f) = I_a(R_f) + I_{cc}R_f(R_f) \\ ITotalZ_{a2}(R_f) = I_a Z_{a2}(R_f) + I_{cc}Z_{a2}(R_f) \\ ITotalR_f(R_f) = I_a R_f(R_f) + I_{cc}R_f(R_f) \\ ITotalZ_b(R_f) = I_b(R_f) + I_{cc}Z_b(R_f) \\ ITotalZ_c(R_f) = I_c(R_f) + I_{cc}Z_c(R_f) \end{array} \right.$$

Ce qui permet enfin de calculer la puissance dissipée par effet joule dans chacune des impédances du circuit électrique du stator :

$$\left\{ \begin{array}{l} PZ_{a1}(R_f) = ||I_{eff}Z_{a1}(R_f)||^2 * Re(Z_{a1}) \\ PZ_{a2}(R_f) = ||I_{eff}Z_{a2}(R_f)||^2 * Re(Z_{a2}) \\ PR_f(R_f) = ||I_{eff}R_f(R_f)||^2 * R_f \\ PZ_b(R_f) = ||I_{eff}Z_b(R_f)||^2 * Re(Z_b) \\ PZ_c(R_f) = ||I_{eff}Z_c(R_f)||^2 * Re(Z_c) \end{array} \right.$$

## 6.5 Les rangs des modes des composants de la MSAP

Les rangs pour les paramètres des composants dans les différents modes sont déterminés par rapport à l'utilisation et sont :

Pour le stator en mode nominal :

$$r_n(E_a^s) = [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[7,10], 0, 33]$$

$$r_n(E_b^s) = [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[7,10], -120, 33]$$

$$\begin{aligned}
 r_n(E_c^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[7,10],120,33] \\
 r_n(I_a^s) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[2,2.5],0,33] \\
 r_n(I_b^s) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[2,2.5],[-125,-120],33] \\
 r_n(I_c^s) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[2,2.5],[120,125],33] \\
 r_n(U_{ab}^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1,0,33] \\
 r_n(U_{bc}^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1,-120,33] \\
 r_n(U_{ca}^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1,120,33] \\
 r_n(R_a^s) &= r_n(R_b^s) = r_n(R_c^s) = [2, 2.4] \\
 r_n(L_a^s) &= r_n(L_b^s) = r_n(L_c^s) = [4.3e - 3, 4.5e - 3]
 \end{aligned}$$

Pour le stator en mode dégradé :

$$\begin{aligned}
 r_d(E_a^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[5,10],0,33] \\
 r_d(E_b^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[5,10],-120,33] \\
 r_d(E_c^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[5,10],120,33] \\
 r_d(I_a^s) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[2.1,3],0,33] \\
 r_d(I_b^s) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[2.1,3],[-135,-120],33] \\
 r_d(I_c^s) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[2.1,3],[120,135],33] \\
 r_d(U_{ab}^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1,0,33] \\
 r_d(U_{bc}^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1,-120,33] \\
 r_d(U_{ca}^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1,120,33] \\
 r_d(R_a^s) &= [1.6 \ 1.9] \\
 r_d(R_b^s) &= r_d(R_c^s) = [2, 2.4] \\
 r_d(L_a^s) &= r_d(L_b^s) = r_d(L_c^s) = [4.3e - 3, 4.5e - 3]
 \end{aligned}$$

Pour le stator en mode de faute :

$$\begin{aligned}
 r_f(E_a^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[5,10],0,33] \\
 r_f(E_b^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[5,10],-120,33] \\
 r_f(E_c^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[5,10],120,33] \\
 r_f(I_a^s) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[2.1,5],0,33] \\
 r_f(I_b^s) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[2.1,5],[-160,-130],33] \\
 r_f(I_c^s) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[2.1,5],[130,160],33] \\
 r_f(U_{ab}^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1,0,33] \\
 r_f(U_{bc}^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1,-120,33] \\
 r_f(U_{ca}^s) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1,120,33] \\
 r_f(R_a^s) &= [0, 1.6] \\
 r_f(R_b^s) &= r_f(R_c^s) = [2, 2.4] \\
 r_f(L_a^s) &= r_f(L_b^s) = r_f(L_c^s) = [4.3e-3, 4.5e-3]
 \end{aligned}$$

Pour le rotor en mode nominal :

$$\begin{aligned}
 r_n(E_a^r) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [10,0,33] \\
 r_n(E_b^r) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [10,-120,33] \\
 r_n(E_c^r) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [10,120,33] \\
 r_n(I_a^r) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [2.06,0,33] \\
 r_n(I_b^r) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [2.06,-120,33] \\
 r_n(I_c^r) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [2.06,120,33]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_n(C_{em}^r) &= [\text{amplitude (Nm), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [0.013, 0, 0] \\
r_n(\Omega^r) &= [\text{amplitude (rpm), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[400, 500], 0, 66] \\
r_n(\theta^r) &= [0, 2\pi] \\
r_n(K_e^r) &= 0.04
\end{aligned}$$

Pour le rotor en configuration anormale :

$$\begin{aligned}
r_a(E_a^r) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [10, 0, 33] \\
r_a(E_b^r) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [10, -120, 33] \\
r_a(E_c^r) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [10, 120, 33] \\
r_a(I_a^r) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [2.06, 0, 33] \\
r_a(I_b^r) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [2.06, -120, 33] \\
r_a(I_c^r) &= [\text{amplitude (A), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [2.06, 120, 33] \\
r_a(C_{em}^r) &= [\text{amplitude (Nm), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [0.013, 0, 0] \\
r_a(\Omega^r) &= [\text{amplitude (rpm), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[250, 650], 0, 66] \\
r_a(\theta^r) &= [0, 2\pi] \\
r_a(K_e^r) &= 0.04
\end{aligned}$$

Pour l'arbre en mode nominal :

$$\begin{aligned}
r_n(C_{em}^a) &= [\text{amplitude (Nm), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [0.013, 0, 66] \\
r_n(\Omega^a) &= [\text{amplitude (rpm), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[400, 500], 0, 66] \\
r_n(\theta^a) &= [0, 2\pi] \\
r_n(K_f^a) &= 0.01 \\
r_n(J^a) &= 4.9e-5
\end{aligned}$$

Pour l'arbre en configuration anormale :

$$\begin{aligned}
r_a(C_{em}^a) &= [\text{amplitude (Nm), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [0.013, 0, 66] \\
r_a(\Omega^a) &= [\text{amplitude (rpm), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [[250, 650], 0, 66] \\
r_a(\theta^a) &= [0, 2\pi] \\
r_a(K_f^a) &= 0.01 \\
r_a(J^a) &= 4.9e-5
\end{aligned}$$

Pour l'environnement en mode nominal :  $r_n(U_{ab}^e) = [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1, 0, 33]$

$$\begin{aligned}
r_n(U_{bc}^e) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1, -120, 33] \\
r_n(U_{ca}^e) &= [\text{amplitude (V), phase (degrés), fréquence (Hz)}] = [22.1, 120, 33]
\end{aligned}$$

## 6.6 Définitions de distances

??

Les paramètres peuvent représenter des quantités de différentes natures. Ils peuvent être de différentes formes, et la distance dépend de la forme du paramètre :

- nombres réels lorsqu'il s'agit d'un paramètre pouvant être représenté par une seule caractéris-

tique (pression par exemple) :  $op(t) = K$ . Alors la distance est la distance euclidienne :  
 $d = \sqrt{(K_1 - K_2)^2}$ .

- nombre complexe lorsqu'il s'agit d'un signal sinusoïdal représenté par trois caractéristiques (phase  $\phi$ , fréquence  $\omega$  et amplitude  $G$ ) :  $op(t) = Ge^{j\phi}e^{j\omega t}$ . Alors la distance est :

$$d = \sqrt{(G_1 \times \cos\phi_1 - G_2 \times \cos\phi_2)^2 + (G_1 \times \sin\phi_1 - G_2 \times \sin\phi_2)^2}$$

, la fréquence étant toujours la même dans ce cas.

- matrice lorsqu'il s'agit d'un signal non sinusoïdal par exemple (permet de représenter les amplitudes et fréquences des harmoniques qui le composent). Pour diminuer les dimensions de la matrice on ne met que les harmoniques présents dans au moins un mode. Alors la distance est

$$d = \sqrt{\sum_{i,j} (a1_{i,j} - a2_{i,j})^2}$$

où  $a1_{i,j}$  est le coefficient de la matrice 1 situé à la  $i^{me}$  ligne et à la  $j^{me}$  colonne.

## 6.7 Etabli de manipulation de la salle d'essais

L'établi de manipulation de la salle d'essais est présenté sur la photographie 6.6. On distingue sur le bureau de gauche à droite, l'ordinateur qui est connecté à l'électronique de puissance, l'oscilloscope, le bornier de connexion, et le moteur testé dans son enceinte de protection. En haut, on voit les capteurs de courant et l'EdP.



FIGURE 6.6 – Photographie de l'essai de caractérisation d'un moteur partiellement court-circuité.



## Bibliographie

- [AF09] A. A. Abdelhafez and A. J. Forsyth. A review of more-electric aircraft. In *13th International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology*, 2009.
- [AGZ08] Romain Adeline, Rafael Gouriveau, and Noureddine Zerhouni. Pronostic de défaillances : Maîtrise de l'erreur de prédiction. In *7ème Conférence Internationale de MOBilisation et SIMulation, (MOSIM'08)*, 2008.
- [AHL<sup>+</sup>13] Normand Amyot, Claude Hudon, Mélanie Lévesque, Mario Bélec, France Brabant, and François-Xavier Frenette. A new prognostic approach for hydro-generator stator windings. In *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2013*, New Orleans, USA, 2013.
- [Ain12] Z.A. Ainazir. Inter-turn fault analysis of a permanent magnet machine using finite element. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(6), June 2012.
- [Aug98] Jean Christophe Auge. *Utilisation d'un modèle à hasard proportionnel pour estimer la fiabilité des composants mécaniques*. PhD thesis, Ecole centrale de Lyon, 1998.
- [BBS09] Edward Balaban, Prasun Bansal, and Paul Stoelting. A diagnostic approach for electro-mechanical actuators in aerospace systems. In *IEEE Aerospace Conference*, 2009.
- [BDR12] A. Bregon, M. Daigle, and I. Roychoudhury. An integrated framework for model-based distributed diagnosis and prognosis. In *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, 2012.
- [BEJ05] D. Bansal, D.-J. Evans, and B. Jones. Application of a real-time predictive maintenance system to a production machine system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(10) :1210–1221, unknown 2005.
- [Bel12] Nuno Belard. *Raisonnement sur les modèles : détection et isolation d'anomalies dans les systèmes de diagnostic*. PhD thesis, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2012.
- [BG] Serge Blanchard and Julien Griffaton. Procédé de détection d'un endommagement d'un roulement de palier d'un moteur.
- [BGW<sup>+</sup>02] T. Brotherton, P. Grabill, D. Wroblewski, R. Friend, B. Sotomayer, and J. Berry. A testbed for data fusion for engine diagnostics and prognostics. In *Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE*, volume 6, pages 3029–3042, 2002.
- [BLCL07] Florent Brissaud, Brice Lanternier, Dominique Charpentier, and Patrick Lyonnet. Modélisation des taux de défaillance en mécanique, combinaison d'une loi de weibull et d'un modèle de cox pour la modélisation des taux de défaillance en fonction du temps et des facteurs d'influence. In *3ème congrès PENTOM Performances et nouvelles technologies en maintenance*, 2007.



- [BNMMT07] T. Boileau, B. Nahid-Mobarakeh, and F. Meibody-Tabar. Back-emf based detection of stator winding inter-turn fault for pm synchronous motor drive. *IEEE*, unknown(unknown), unknown 2007.
- [BOU12] Mohammed-Farouk BOUAZIZ. *Contribution à la modélisation Bayésienne de l'état de santé d'un système complexe : Application à l'industrie du semiconducteur*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2012.
- [BRG02] Carl S. Byington, Michael J. Roemer, and Thomas Galie. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance. *IEEE*, 6 :2815–2824, 2002.
- [BS04] Carl S. Byington and Paul Stoelting. A model-based approach to prognostics and health management for flight control actuators. In *IEEE Aerospace Conference*, 2004.
- [Buf09] Jean Bufferne. La fiabilité des équipements industriels. *Technologie*, 161 :28–33, 2009.
- [Bug04] Manuela Mateos Bugatti. *Dimensionnement par optimisation des inducteurs à aimants pour application auxiliaire automobile*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.
- [CB09] A. Chen and J. Blue. Recipe-independent health indicator for tool predictive maintenance and fault diagnosis. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 22(4) :522–535, unknown 2009.
- [CC04] David Chelidze and Joseph P. Cusumano. A dynamical systems approach to failure prognosis. *Journal of vibration and acoustics*, January 2004.
- [CC10] Fatih Camci and Ratna Babu Chinnam. Health-state estimation and prognostics in machining processes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 7(3), July 2010.
- [CCF99] A J Marques Cardoso, S M A Cruz, and D S B Fonseca. Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors by park's vector approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(3), unknown 1999.
- [CDL<sup>+</sup>04] M. Cordier, P. Dague, F. Lévy, J. Montmain, M. Starowiecki, and L. Travé-Massuyès. Conflicts versus analytical redundancy relations : a comparative analysis of the model-based diagnostic approach from the artificial intelligence and automatic control perspective. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics - Part B*, 34(52163-2177), 2004.
- [Cen04] System Reliability Center. Accelerated testing of systems and assemblies. Technical report, Alion Science and Technology, 2004.
- [CFRS09] D Casadei, F Filippetti, C Rossi, and A Stefani. Magnet fault characterization for permanent magnet synchronous motors. In *IEEE International Symposium on diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2009.
- [CMS04] V. Cocquempot, T. El Mezyani, and M. Staroswiecki. *Fault Detection and Isolation for hybrid systems using structured parity residuals*. Springer, 2004.
- [Coc04] Vincent Cocquempot. *Contribution à la surveillance de systèmes industriels complexes*. Université des Sciences et Technologie de Lille, 2004.
- [CVLI09] Pierre Cochetoux, Alexandre Voisin, Eric Levrat, and Benoît Iung. Prognostic design : requirements and tools. In *11th International Conference on The Modern*

- 
- Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises (MITIP)*, 2009.
- [CVLI10] Pierre Cocheteux, Alexandre Voisin, Eric Levrat, and Benoît Iung. System performance prognostic : context, issues and requirements. In *1st IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology (A-MEST'10)*, 2010.
- [DG11] Matthew Daigle and Kai Goebel. Prognostics for ground support systems : case study on pneumatic valves. Technical report, National Aeronautics and Space Administration, 2011.
- [DGD<sup>+</sup>09] Otilia Elena Dragomir, Rafael Gouriveau, Florin Dragomir, Eugenia Minca, and Noureddine Zerhouni. Review of prognostic problem in condition-based maintenance. In *European Control Conference*, 2009.
- [DHH<sup>+</sup>11] S. Das, R. Hall, S. Herzog, G. Harrison, and M. Bodkin. Essential steps in prognostic health management. In *IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, pages 1–9, 2011.
- [dIPI13] Institut National de la Propriété Industrielle. Espacenet : recherche sur les brevets, 2013. <http://espacenet.com>.
- [dR06] Etienne de Rocquigny. La maîtrise des incertitudes dans un contexte industriel : une approche méthodologique globale basée sur des exemples. *Journal de la Société Française de Statistique*, 147, 2006.
- [DTS11] J-C. Derien, P. Tieys, and D. Senegas. Covadis ema aileron covadis development. In *SAE International 2011*, 2011.
- [Dub01] Bernard Dubuisson. *Automatique et statistiques pour le diagnostic*. Hermes Science publications IC2 productique, 2001.
- [EGBH00] Stephen Engel, Barbara Gilmartin, Kenneth Bongort, and Andrew Hess. Prognostics, the real issues involved with predicting life remaining. *IEEE*, pages 457–469, 2000.
- [EM06] Luis A. Escobar and William Q. Meeker. A review of accelerated test models. *Statistical Science*, 21 :552–577, 2006.
- [Far08] J A Farooq. *Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents*. PhD thesis, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
- [FID13] FIDES. A methodology for components reliability, 2013. [www.fides-reliability.org](http://www.fides-reliability.org).
- [FZA10] Jeanne Feillee, Rachid Ziani, and Marc Antoni. Modeling and prediction of the catenary contact wire degradation in space and time. In *17ème congrès des Risques et de Sécurité de Fonctionnement*, 2010.
- [GCKV05] Levent U. Gökdere<sup>1</sup>, Stephen L. Chiu, Kirby J. Keller, and John Vian. Lifetime control of electromechanical actuators. *IEEEAC*, 2005.
- [GD11] David Gucik-Derigny. *Contribution au pronostic des systèmes à base de modèles : théorie et application*. PhD thesis, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, 2011.
- [GEP09] Nagi Gebraeel, Alaa Elwany, and Jing Pan. Residual life predictions in the basence of prior degradation knowledge. *IEEE transactions on reliability*, 58 :106–117, 2009.
- [Ger98] Janos Gertler. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Taylor & Francis, 1998.
-

- [GP02] Frank L. Greitzer and Ronald A. Pawlowski. Embedded prognostics health monitoring. In *International Instrumentation Symposium on Embedded Health Monitoring Workshop*, 2002.
- [Gri] Julien Griffaton. Procédé de détection d'un endommagement d'au moins un roulement de palier d'un moteur.
- [GTBS06] K.M. Goh, B. Tjahjono, T. Baines, and S. Subramaniam. A review of research in manufacturing prognostics. In *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pages 412–422, 2006.
- [HCBB12] K.T. Huynh, I.T. Castro, A. Barros, and C. Berenguer. On the construction of mean residual life for maintenance decision-making. In *8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS)*, 2012.
- [HCdK92] W. Hamscher, L. Console, and J. de Kleer. *Readings in model-based diagnosis*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1992.
- [Hen96] T. Henzinger. The theory of hybrid automata. In *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science*, pages 278–292, 1996.
- [HS03] P.L. Hall and J.E. Strutt. Probabilistic physics-of-failure models for component reliabilities using monte carlo simulation and weibull analysis : a parametric study. *Reliability Engineering and System Safety*, 30 :233–242, 2003.
- [HSA94] F. Hamelin, D. Sauter, and M. Aubrun. Fault diagnosis in systems using directional residuals. In *Decision and Control, 1994., Proceedings of the 33rd IEEE Conference on*, volume 3, pages 3040–3045 vol.3, 1994.
- [Hu11] Chao Hu. Ensemble of data-driven prognostic algorithms for robust prediction of remaining useful life. In *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, 2011.
- [HZTM09] Aiwin Heng, Sheng Zhang, Andy C. C. Tan, and Joseph Mathew. Rotating machinery prognostics : State of the art, challenges and opportunities. *Mechanical Systems and Signal Processing* 23, pages 724–739, 2009.
- [IB97] R. Isermann and P. Ballé. Terminology in the area of fault management, 1997. <http://www.safeprocess.es.aau.dk/index.php?id=9033>.
- [Ise05a] R. Isermann. *Fault diagnosis systems : an introduction from Fault detection to fault tolerance*. Springer, 2005.
- [Ise05b] R. Isermann. Model-based fault detection and diagnosis - status and applications. *Annual Reviews in Control*, 29 :71–85, 2005.
- [Jac98] P. Jackson. *Introduction to Expert Systems*. Addison-Wesley, 1998.
- [KGZ08] Mohamed El Koujok, Rafael Gouriveau, and Nouredine Zerhouni. From monitoring data to remaining useful life : an evolving approach including uncertainty. In *34th European Safety Reliability and Data Association, ESReDA Seminar and 2nd Joint ESReDA/ESRA Seminar on Supporting Technologies for Advanced Maintenance Information Management*, 2008.
- [Kho09] M Khov. Monitoring of turn short-circuit faults in stator of pmsm in closed loop by on-line parameter estimation. In *7th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2009.

- 
- [KKB<sup>+</sup>13] Hamed Khorasgani, Chetan Kulkarni, Gautam Biswas, Jose R. Celaya, and Kai Goebel. Degredation modeling and remaining useful life prediction of electrolytic capacitors under thermal overstress condition using particle filters. In *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2013*, New Orleans, USA, 2013.
- [KKKL09] Ki-Chan Kim, Kwangsoo Kim, Hee Jun Kim, and Ju Lee. Demagnetization analysis of permanent magnets according to rotor types of interior permanent magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(6), June 2009.
- [Kou10] Mohamed El Koujok. *Contribution au pronostic industriel : intégration de la confiance à un modèle prédictif neuro-flou*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2010.
- [Law04] Lawless. Covariates and random effects in a gamma process model with application to degradation and failure. *Lifetime Data Analysis*, 10 :213–227, 2004.
- [LD09] Christophe Letot and Pierre Dehombreux. Modèles de dégradation pour l'estimation de la fiabilité et de la durée de vie résiduelle : application à la fissuration. *unknown*, 2009.
- [LFMM11] N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, and P. Maussion. Electrical ageing modeling of the insulation of low voltage rotating machines fed by inverters with the design of experiments (doe) method. In *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2011.
- [LGP13] Jérôme Lacaille, Aurélie Gouby, and Olivier Piol. Wear prognostic on turbofan engines. In *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2013*, New Orleans, USA, 2013.
- [LHMN07] Yvan Lefevre, Carole Henaux, Frederic Messine, and Bertrand Nogarede. Enjeux de la modélisation et de la conception des actionneurs électromécaniques des commandes de vol électrique. Technical report, ENSEEIHT/LAPLACE, 2007.
- [Lig09] Jean-Claude Ligeron. Cours de fiabilité en mécanique. Technical report, Institut pour la Maîtrise des Risques, 2009.
- [Lle08] Eduard Diez Lledo. *Diagnostic et Pronostic de défaillances dans des composants d'un moteur d'avion*. PhD thesis, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [LMS13] LMS. The lms imagine.lab amesim suite, 2013. <http://www.lmsfrance.fr/imagine-amesim-suite>.
- [LNP<sup>+</sup>03] Jianhui Luo, M. Namburu, K. Pattipati, Liu Qiao, M. Kawamoto, and S. Chigusa. Model-based prognostic techniques. In *IEEE System Readiness Technology Conference (AUTOTESTCON)*, 2003.
- [LRB02] M. Lebold, K. Reichard, and C.-S. Byington. Osa-cbm architecture development with emphasis on xml implementations. In *Maintenance and Reliability Conference*, 2002.
- [Mai12] Julien Maillard. Modélisation et simulation d'une pompe d'actionneur électro-hydrostatique. Technical report, Institut Clément Ader, INSA de Toulouse, 2012.
- [Mar06] Jean-Charles Maré. The recent developments in aerospace hydraulics, focusing on the new airbus a380. In *The 19th International Conference on Hydraulics and Pneumatics*, 2006.
-

- [Mar07] Jean-Charles Maré. Aircraft landing gear actuation technologies : comparaison of eha, ema and electro-hydraulique actuation. In *International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components*, 2007.
- [Mat13] MathWorks. Matlab, 2013. <http://www.mathworks.fr/products/matlab/>.
- [MCP<sup>+</sup>01] A. Mathur, K. Cavanaugh, K. Pattipati, P. Willet, and T. Galie. Reasoning and modeling systems in diagnosis and prognosis. In *SPIE Aerosense Conference, Orlando, USA*, 2001.
- [Mee13] David Meeker. Finite element method magnetics, 2013. <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.
- [Met12] Julien Metayer. Etude d’une pompe eha. Technical report, SimFonIA, 2012.
- [Mor13] Yves Mortureux. *Méthodes d’analyse des risques*, volume base documentaire : 42155210. Editions Techniques de l’ingénieur, 2013.
- [Mul05] A. Muller. *Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d’un processus de pronostic*. PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy 1. France., 2005.
- [NEV12] Patrice NEVORET. Astech paris région - les projets, 2012. [www.pole-astech.org/](http://www.pole-astech.org/).
- [NLM<sup>+</sup>09] Gorjian Nima, Ma Lin, Mittinty Murthy, Yarlagadda Prasad, and Sun Yong. A review on degradation models in reliability analysis. In *Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management*, 28-30 September 2009.
- [Nor96] Norme AFNOR XP X 07-020. Normes fondamentales : Guide pour l’expression de l’incertitude de mesures. *NF ENV 13005*, 1996.
- [ORCA12] Simona Onori, Giorgio Rizzoni, and Andrea Cordoba-Arenas. A prognostic methodology for interconnected systems : preliminary results. In *8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, 2012.
- [Pom10] Sylvie Pommier. *Mécanique des matériaux*. ENS Cachan, 2009-2010.
- [PSF94] J Penman, H G Sedding, and W T Fink. Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(4), Jan 1994.
- [Puc08] Xavier Pucel. *A unified point of view on diagnosability*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2008.
- [QLE09] Hai Qiu, Huageng Luo, and Neil Eklund. On-board bearing prognostics in aircraft engine : enveloping analysis or fft ? Technical report, General Electric Company, 2009.
- [Ray99] Asok Ray. Stochastic modeling of fatigue crack damage for risk analysis and remaining life prédiction. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control (ASME)*, 121(3), Jan 1999.
- [RBA10] C Ruschetti, G Bossio, and C De Angelo. Effects of partial rotor demagnetization on permanent magnet synchronous machines. In *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2010.
- [RD11] I. Roychoudhury and M. Daigle. An integrated model-based diagnostic and prognostic framework. In *The 20th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX)*, 2011.

- 
- [Rib09] Pauline Ribot. *Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes*. PhD thesis, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2009.
- [SCB<sup>+</sup>01] Abhinav Saxena, Jose Celaya, Edward Balaban, Kai Goebel, Bhaskar Saha, Sankalita Saha, and Mark Schwabacher. Metrics for evaluating performance of prognostic techniques. *Metrics for Evaluating Performance of Prognostic Techniques*, 72 :39–45, 2001.
- [SG09] Mark Schwabacher and Kai Goebel. A survey of artificial intelligence for prognostics. *IEEE*, 2009.
- [SG13] Shankar Sankararaman and Kai Goebel. Why is the remaining useful life prediction uncertain? In *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2013*, New Orleans, USA, 2013.
- [SKF13] SKF. Choix des dimensions du roulement à l'aide des formules de durée, 2013. <https://www.skf.com/fr/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/selection-of-bearing-size/selecting-bearing-size-using-the-life-equations/index.html>.
- [SKP<sup>+</sup>11] Chaitanya Sankavaram, Anuradha Kodali, Krishna Pattipati, Bing Wang, Mohammad S. Azam, and Satnam Singh. A prognostic framework for health management of coupled systems. In *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, 2011.
- [SLL11] D. Siegel, J. Lee, and C. Ly. Methodology and framework for predicting rolling element helicopter bearing failure. In *Prognostics and Health Management (PHM), 2011 IEEE Conference on*, pages 1–9, 2011.
- [SSL<sup>+</sup>95] Meera Sampath, Raja Sengupta, Stéphane Lafortune, Kasim Sinnamohideen, and Demosthenis Teneketzis. Diagnosability of discrete-event systems. *IEEE Transactions on automatic control*, 40, 1995.
- [TDK<sup>+</sup>10] Liang Tang, Jonathan DeCastro, Greg Kacprzynski, Kai Goebel, and George Vachtsevanos. Filtering and prediction techniques for model based prognosis and uncertainty management. In *Prognostics and System Health Management Conference*, 2010.
- [Teb05] Ouahiba Tebbi. *Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés*. PhD thesis, Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers, 2005.
- [Tra05] Moussa Amadou Traoré. *Supervision adaptative et pronostic de défaillance pour la maintenance prévisionnelle de systèmes évolutifs complexes*. PhD thesis, Université Lille1 - Sciences et Technologies, 2005.
- [Tri11] J-C Trigeassou. *Diagnostic des machines électriques*. Lavoisier, 2011.
- [Uni08] Linköping University. Formula book for hydraulics and pneumatics. Technical report, Fluid and Mechanical Engineering Systems Department of Management and Engineering, 2008.
- [Vas08] Otilia Elena Vasile. *Contribution au pronostic de défaillances par réseau neuro-flou : maîtrise de l'erreur de prédiction*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2008.
- [Vas11] B Vaseghi. Modelling and study of pm machines with inter-turn fault dynamic model - fem model. *ELSEVIER, Electric Power Systems Research (EPSR)*, 2011.
-

- 
- [VCP12] Garance Vinson, Michel Combacau, and Thomas Prado. Permanent magnet synchronous machines faults detection and identification. In *8th IFAC International Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS)*, 2012.
- [VCPR12] Garance Vinson, Michel Combacau, Thomas Prado, and Pauline Ribot. Synchronous machine faults detection and diagnosis for electromechanical actuators in aeronautics. In *38th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON)*, 2012.
- [Ven07] Pascal Venet. *HDR : Amélioration de la sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie*. PhD thesis, Université Claude Bernard - Lyon 1, 2007.
- [Vil97] A. Villemeur. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Eyrolles, 1997.
- [VLCI10] A. Voisin, E. Levrat, P. Cocheteux, and B. Iung. Generic prognosis model for proactive maintenance decision support : application to pre-industrial e-maintenance test bed. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21 :177–193, 2010.
- [VMOM<sup>+</sup>13] Alexandre Voisin, Gabriela Medina-Oliva, Maxime Monnin, Jean-Baptiste Leger, and Benoit Iung. Fleet-wide diagnostic and prognostic assessment. In *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2013*, New Orleans, USA, 2013.
- [vNK02] J.M. van Noortwijk and H.E. Klatter. The use of lifetime distributions in bridge replacement modelling. In *First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, 2002.
- [vNKP00] J.M. van Noortwijk, M.J. Kallen, and M.D. Pandey. Gamma processes for time-dependant reliability of structures. *unknown*, 2000.
- [VW01] G. Vachtsevanos and P. Wang. Fault prognosis using dynamic wavelet neural networks. In *AUTOTESTCON Proceedings, 2001. IEEE Systems Readiness Technology Conference*, pages 857–870, 2001.
- [Wik13] Wikipedia. Weibull distribution, 2013. <http://en.wikipedia.org/wiki/Weibull-distribution>.
- [Wil00] Théodore Wildi. *Electrotechnique*. DeBoeck Université, 2000.
- [WPJ04] P. Weber, P.Munteanu, and L. Jouffe. Dynamic bayesian networks modelling the dependability of systems with degradations and exogenous constraints. In *11th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'04)*, 2004.
- [ZF06] R. Zemouri and J.-M. Faure. Diagnosis of discrete event system by stochastic timed automata. In *the IEEE International Conference on Control Applications*, pages 1861–1866, Munich, Germany, October 4-6 2006.
- [ZKX<sup>+</sup>07] Guangfan Zhang, Chiman Kwan, Roger Xu, Nikhil Vichare, and Michael Pecht. An enhanced prognostic model for intermittent failures in digital electronics. *IEEE*, pages 177–193, 2007.



## Résumé

L'industrie aéronautique est un marché en perpétuelle évolution où les exigences sur les équipements sont hautes, et où la concurrence est rude entre les équipementiers. Il est donc primordial de tenir les enjeux de réduction de coût et de délai, de qualité, de fiabilité, de disponibilité opérationnelle et de sûreté de fonctionnement. L'un des leviers sur lesquels peuvent appuyer les équipementiers pour rendre leurs produits plus attractifs aux yeux des compagnies aériennes est l'optimisation des opérations de maintenance. Dans cette optique, une voie de plus en plus explorée par les industriels est le suivi de l'état de santé.

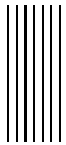
Dans l'objectif de proposer l'intégration du diagnostic et du pronostic dans une même méthode, ces travaux proposent une approche formelle de suivi de l'état de santé des équipements, dont une finalité permettra d'optimiser l'organisation des opérations de maintenance. La méthode est basée sur un cadre de modélisation générique. Ce cadre permet de représenter le comportement de tout système complexe à un instant donné, ainsi que l'évolution de son état de santé dans le temps en fonction du stress qu'il subit. Le modèle ainsi construit synthétise les informations nécessaires à la fois au diagnostic et au pronostic. Le diagnostic permet de connaître l'ensemble des endommagements et fautes présents dans les différents composants du système, et les éventuelles pertes de performance et défaillances associées. Le pronostic permet, à partir du résultat de diagnostic, de prédire l'état de santé futur du système et d'en déduire la nature et les instants d'apparition des futures défaillances. Les métriques de performance du diagnostic et du pronostic, ainsi que les incertitudes liées au pronostic, sont discutées et intégrées à l'approche formelle.

L'application choisie pour ce travail de recherche est le groupe moto-pompe d'actionneurs électro-hydrostatiques, une technologie poussée par Messier-Bugatti-Dowty pour répondre aux besoins des futurs avions tout électriques. La démarche de suivi de l'état de santé porte sur deux éléments critiques : la machine synchrone à aimants permanents et la pompe hydraulique. L'application montre la faisabilité du suivi de l'état de santé, et met en évidence des verrous qu'il convient de traiter de manière pluridisciplinaire pour obtenir, en particulier, des lois de vieillissement réalistes.



---

---



## Abstract

The aviation industry is a changing market where demands on the equipment are high, and competition is fierce among manufacturers. Therefore cost reduction, quality, reliability, operational availability and dependability become the cornerstone of this industry. One of the levers that can support manufacturers to make their products more attractive for airlines is the optimization of maintenance. A way to achieve this is health-monitoring.

In order to provide the integration of diagnosis and prognosis in one same method, this thesis proposes a formal approach of health-monitoring. One of the aims is to help in the optimization of maintenance operation. The method is based on a generic modeling framework. This framework represents the behavior of any complex system at a given time, and the evolution of its health over time depending on the stress it undergoes. The model summarizes the information needed for both diagnosis and prognosis. The diagnosis provides a good knowledge of all the damages and faults present in the components of the system, and any associated losses of performance and failures. From the result of diagnosis, the prognosis allows the prediction of the future health state of the system and the deduction of the nature and the times of occurrence of future possible failures. Performance metrics in the diagnosis and prognosis, as well as uncertainties related to prognosis, are discussed and integrated in the formal approach.

The chosen application is the motor-pump of an electro-hydrostatic actuator, a technology pushed by Messier-Bugatti-Dowty to meet the needs of future all-electric aircrafts. The process of monitoring the health state focuses on two critical elements : a synchronous permanent magnet machine and a hydraulic pump. The application shows the feasibility of health-monitoring, and highlights the problems that should be treated in the future to obtain, in particular, realistic aging laws.





