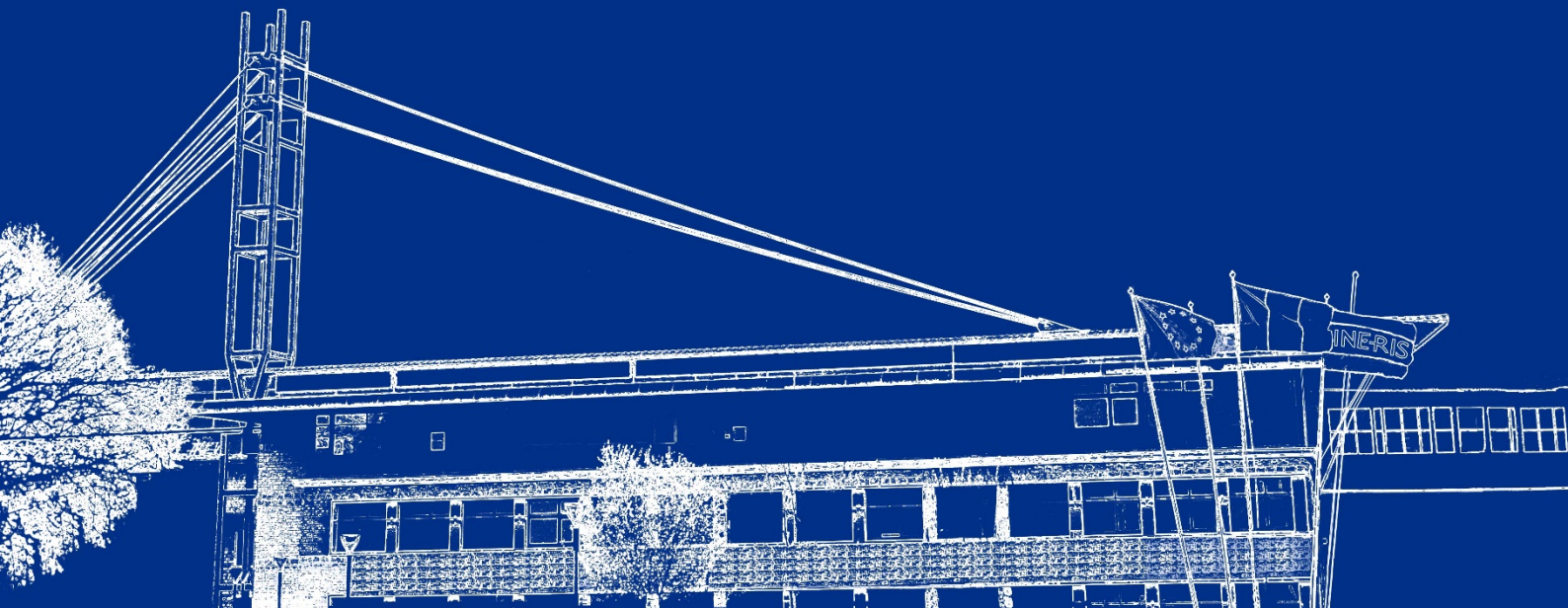




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 212476 - 2772078 - v1.0

06/02/2025

Jalon 17 : Méthodologie de quantification des fréquences d'événements associés aux nouvelles technologies et de l'articulation du vieillissement avec les études de sécurité

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : TARRISSE Albin - PROD'HOMME GAETAN

Vérification : VALLEE AGNES; LE ROUX BENJAMIN; MASSE FRANCOIS; PRATS FRANCK; BOUET REMY

Approbation : Document approuvé le 06/02/2025 par DUPLANTIER STEPHANE

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	Contexte et enjeux	9
1.2	Plan et contenu	10
2	Eléments de méthodologie générale pour la quantification probabiliste	12
2.1	Le management des risques	12
2.1.1	Le processus de management du risque	12
2.1.2	L'estimation de la vraisemblance	13
2.1.3	Les données d'entrée utilisées	14
2.2	La quantification probabiliste dans les études de dangers	18
2.2.1	Le processus de l'étude de dangers	18
2.2.2	Prise en compte de la vraisemblance dans les études de dangers	19
2.3	La maîtrise du vieillissement	22
2.3.1	Introduction et généralités sur la maîtrise du vieillissement	22
2.3.2	La prise en compte de la dégradation : gestion « physique » du vieillissement	27
2.3.3	Les principaux mécanismes de dégradation	27
2.3.4	Généralités et problématiques du vieillissement dans la gestion des risques	29
2.4	Problématique de prise en compte du vieillissement dans les études de sécurité et les études de dangers	34
2.5	Processus d'évaluation probabilistes des risques d'un nouveau système	36
2.5.1	La démarche actuelle : les statistiques fréquentistes	36
2.5.2	Processus de fiabilisation d'un système en sûreté de fonctionnement	37
2.5.3	Processus d'estimation de la probabilité d'événements en lien avec les technologies émergentes	37
3	Collecte de données	40
3.1	Collecte du retour d'expérience et de données terrain	40
3.1.1	Objectifs de la collecte de retour d'expérience et processus de mise en œuvre	40
3.1.2	Evaluation de la qualité du REX et de son adéquation à d'autres configurations	42
3.1.3	Collecte de données par inspection	42
3.2	Elicitation de l'avis d'experts	43
3.2.1	Objectifs et caractéristiques du jugement d'experts	43
3.2.2	Un processus de mise en œuvre de l'estimation par le jugement d'experts : la méthode de Delphes44	
3.3	Essais de fiabilité	45
3.3.1	Essais en conditions nominales	45
3.3.2	Essais bayésiens	46
3.3.3	Essais accélérés	46
3.3.4	Plan d'expériences	51
3.3.5	Choix de l'essai de fiabilité	52
3.3.6	Processus d'une démarche de plan d'essais	53
3.4	Caractéristiques des méthodes de collecte de données	55
4	Modélisation de la probabilité d'événements	57
4.1	Familles de modèles	57

4.1.1	Les approches basées sur les modèles statistiques.....	57
4.1.2	Les approches basées sur les modèles stochastiques.....	57
4.1.3	Les approches basées sur les modèles bayésiens	57
4.1.4	Les approches basées sur les modèles physiques	58
4.1.5	Les autres approches de modélisation de la probabilité.....	58
4.2	Caractéristiques des modèles	58
4.2.1	Modèle probabiliste ou déterministe	58
4.2.2	Modèle basé sur des données « physiques » ou « statistiques ».....	58
4.2.3	Modèle paramétrique, semi-paramétrique ou non paramétrique	59
4.2.4	Modèle de durée de vie ou modèle de détérioration.....	59
4.3	Présentation des modèles	60
4.3.1	Distributions non-paramétriques	61
4.3.2	Distributions paramétriques : approche statistique de la durée de vie	61
4.3.3	Modèle ARMA.....	62
4.3.4	Processus stochastiques	63
4.3.5	Réseaux bayésiens.....	64
4.3.6	Méthodes résistance-contrainte.....	64
4.4	Processus de modélisation de la probabilité	68
4.5	Evaluation de la qualité des modèles	70
4.6	Caractéristiques des modèles de la probabilité	72
5	Méthodes d'obtention de la probabilité par la pondération	75
5.1	Principes généraux de la démarche de pondération des probabilités	75
5.2	Les méthodes bayésiennes	76
5.2.1	Principes généraux de l'approche bayésienne	76
5.2.2	Processus de mise en œuvre d'une approche bayésienne	76
5.3	Pondération par un modèle semi-quantitatif basé sur le jugement d'experts	84
5.3.1	Principes de mise en œuvre de la démarche	84
5.3.2	Pondération des causes par le jugement d'experts.....	84
5.4	Pondération au moyen de modèles basés sur la physique et statistiques	85
5.4.1	Illustration pour les composants électriques ou électroniques : base de données FIDES 85	
5.4.2	Illustration pour les composants mécaniques : base de données NSWG	86
5.4.3	Application dans le secteur nucléaire	86
5.5	Pondération par un modèle statistique global : le modèle de Cox	86
5.6	Processus de mise en œuvre d'une approche de pondération des probabilités	88
5.7	Caractéristiques des méthodes de pondération de la probabilité.....	90
6	Evaluation des risques pour le suivi des équipements.....	92
6.1	Méthodes de gestion des risques de vieillissement de technologies matures	92
6.2	Méthodologie de l'organisation de l'inspection et de la maintenance.....	95
6.2.1	Méthodologies basées sur le classement.....	95
6.2.2	Méthodes basées sur la criticité.....	97
6.2.3	Méthodes basées sur la fiabilité mécanique	102
6.2.4	Synthèse sur les méthodes de suivi des composants passifs	104

6.2.5	Approches pour le suivi des composants actifs	107
6.2.6	Problématiques pour les technologies émergentes	111
6.3	Pistes de réflexion sur l'intégration de la gestion du vieillissement dans les études de sécurité et les études de dangers	112
6.3.1	Synthèse des possibilités d'interaction étude de dangers et suivi des équipements	112
6.3.2	Pistes de réflexion.....	114
7	Conclusions et perspectives générales	116
8	Références	119
9	Annexes.....	122

Table des figures

Figure 1 : Processus de management du risque (adapté de la norme NF ISO 31000 : 2018)	12
Figure 2 : Fiabilité de systèmes soumis à des défaillances cataclysmiques (gauche) ou à des dégradations (droite) (Delage, 2018)	15
Figure 3 : Modèles de la courbe en baignoire – composants électriques / électroniques (à gauche), composants mécaniques (à droite)	16
Figure 4 : Modèle de la courbe en baignoire et hypothèse de l'évaluation des risques	17
Figure 5 : Représentation graphique des différents types de censures	18
Figure 6 : Processus de réalisation d'une étude de dangers pour les installations classées (Ineris, 2015)	19
Figure 7 : Échelle réglementaire relative à la détermination de la probabilité d'occurrence annuelle d'un phénomène dangereux (arrêté PCIG du 29 septembre 2005)	20
Figure 8 : Représentation graphique théorique d'un nœud papillon	21
Figure 9 : Evolution physique de la dégradation d'un composant.....	26
Figure 10 : Évolution de la probabilité de défaillance en fonction de l'âge de la structure (IMdR, 2014)	30
Figure 11 : Outils de sûreté de fonctionnement pour accroître la fiabilité d'un système critique (Tebbi, 2005)	37
Figure 12 : Processus d'évaluation des probabilités d'événements.....	38
Figure 13 : Schéma de principe des essais accélérés (Tebbi, 2005).....	46
Figure 14 : Schéma de principe d'un plan d'expériences d'essais accélérés à niveaux constants (Tebbi, 2005)	47
Figure 15 : Schéma de principe d'un plan d'expériences d'essais accélérés à niveaux évolutifs (Tebbi, 2005)	48
Figure 16 : Représentation schématique des différentes zones de stress d'un dispositif (Tebbi, 2005)	48
Figure 17 : Représentation graphique d'un modèle Standard de Vie Accélérée (Tebbi, 2005)	49
Figure 18 : Exemples de trajectoires d'un processus de Gamma (gauche) et d'un processus de Wiener (droite)	63
Figure 19 : Méthode résistance-contrainte déterministe (gauche) et probabiliste (droite)	65
Figure 20 : Schémas de principe de la méthode bayésienne.....	76
Figure 21 : Processus de mise en œuvre d'une approche bayésienne	77
Figure 22 : Schéma du processus de la méthode de quantification par pondération des causes	88
Figure 23 : Schéma de la catégorisation simplifiée des méthodes de suivi (IMdR, 2014).	94
Figure 24 : Schéma de la méthodologie basée sur le classement (IMdR, 2014).	96
Figure 25 : Schéma de la méthode basée sur la criticité (IMdR, 2014).....	99
Figure 26: Logique d'application des méthodes de suivi des composants passifs	107
Figure 27 : Représentation de l'avis d'experts sous la forme d'intervalles.....	144
Figure 28 : Distribution uniforme d'un taux de défaillance.....	144
Figure 29 : Distribution triangulaire d'un taux de défaillance.....	144
Figure 30 : Distribution d'une loi Gamma	145
Figure 31 : Influence de l'atmosphère sur le taux de corrosion (Morcillo et al., 2013)	148
Figure 32 : Influence de l'acier sur le taux de corrosion (Castano et al., 2010)	148
Figure 33 : Evolution de la contrainte radiale dans un tube DN10 pressurisé à 70 MPa en fonction de l'épaisseur du tube e	149
Figure 34 : Représentation graphique d'un desserrage d'une bride plate	151

Figure 35 : Croquis d'un clapet de retenue à cône haute pression (extrait du catalogue Maximator)	153
Figure 36 : Densités de probabilité du taux de défaillance a priori et a posteriori.....	156

Table des tableaux

Tableau 1 : Sources de données fréquemment utilisées lors de la quantification probabiliste de l'évaluation des risques	22
Tableau 2 : Principales techniques d'inspection selon les dégradations recherchées.....	31
Tableau 3 : Synthèse des principales lois d'accélération	50
Tableau 4 : Etapes des processus de mise en œuvre d'essais accélérés (gauche) et bayésiens (droite)	54
Tableau 5 : Caractéristiques des méthodes de collecte de données	56
Tableau 6 : Synthèse des caractéristiques des modèles probabilistes	60
Tableau 7 : Principaux mécanismes de dégradation des systèmes mécaniques, électriques et électroniques	66
Tableau 8 : Caractéristiques des méthodes de modélisation de la probabilité	74
Tableau 9 : Fonctions de vraisemblance et densités a priori de Jeffreys associées.....	79
Tableau 10 : Principales lois conjuguées	80
Tableau 11 : Caractéristiques des méthodes de pondération de la probabilité	91
Tableau 12 : Exemples de secteurs connus pour l'utilisation des différentes méthodes et organismes moteurs autour de ces méthodes (IMdR, 2014)	94
Tableau 13 Synthèse des méthodes de suivi du vieillissement des composants passifs	105
Tableau 14 : Applicabilité des méthodes de suivi des composants passifs	106
Tableau 15 : Applicabilité des méthodes de suivi des composants actifs	110
Tableau 16 : Capacité des méthodes à modéliser la probabilité avec peu de données de retour d'expérience et à représenter l'aspect dynamique de la probabilité.....	117
Tableau 17 : Récapitulatif des durées par type d'essais	142

Résumé

Les installations industrielles qui utilisent des produits, des procédés ou des systèmes faisant peser un risque sur la population, l'environnement ou les biens doivent faire l'objet d'études pour répondre à un besoin d'amélioration de la sécurité ou pour démontrer la maîtrise du risque auprès d'une autorité de contrôle.

Dans ce cadre, l'évaluation des risques nécessite la mise en œuvre d'outils et de méthodes notamment pour quantifier la probabilité d'événements et pour suivre le vieillissement des systèmes. Alors que ces outils et méthodes sont adaptés aux technologies matures, il s'avère que le manque de données et la méconnaissance des systèmes et des défaillances représentent des freins à l'application de ces méthodes aux technologies émergentes.

L'objectif de ce travail est alors de souligner les particularités des nouvelles technologies et de proposer des pistes de réflexion et d'amélioration de la maîtrise des risques industriels au regard de deux points spécifiques que sont : la quantification probabiliste dans le cadre du management des risques et la prise en compte de leur vieillissement.

Après avoir introduit un certain nombre de notions fondamentales à la réalisation et à la compréhension de ces études, le rapport se compose de deux parties.

Une première partie est consacrée à la présentation d'un état de l'art des méthodes de quantification probabilistes des analyses de risques. Les outils et méthodes correspondant à la collecte de données, à la modélisation et à la pondération de la probabilité sont présentées tout en s'attachant à détailler les avantages, limites et contraintes d'application afin de guider l'analyste.

La seconde partie, quant à elle, décrit les méthodes de suivi du vieillissement des systèmes et questionne l'articulation entre les études de sécurité et les études de suivi du vieillissement en analysant leurs similarités et les obstacles éventuels. Finalement, des pistes permettant un rapprochement de ces études sont investiguées en proposant plusieurs axes de travail futurs.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 212476 - v1.0, 06/02/2025.

Mots-clés :

Analyse des risques ; technologie émergente ; quantification probabiliste ; maîtrise du vieillissement

Glossaire

Add : Arbre de défaillance

AMDEC : Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et la criticité

APR : Analyse préliminaire des risques

ARMA : AutoRegressive Moving Average

EDD : Etude de dangers

Ei : Evénement initiateur

EI : Evénement intermédiaire

ERC : Evénement redouté central

ES : Evénement secondaire

F-N : Courbes représentant le risque sociétal en combinant la fréquence d'événements et les conséquences, en général le nombre de décès

FORM-SORM : Méthode de fiabilité du premier ordre et méthode de fiabilité du second ordre

HAZID : Hazard Identification

HAZOP : Hazard and Operability Analysis

ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement

LOPA : Layer Of Protection Analysis

MMR : Mesure de maîtrise des risques

MTTF : Mean time to failure – Temps moyen de défaillance

PCIG : Probabilité, Cinétique, Intensité, Gravité

PEX : Plan d'expérience

PhD : Phénomène dangereux

PM2I : Plan de modernisation des installations industrielles

POA : Probabilité d'Occurrence Annuelle

R-C : Résistance-Contrainte (méthode)

REX : Retour d'expérience

SIR : Service d'inspection reconnu

SVA : Modèles Standard de vie accélérée

Définitions

Défaillance catalectique : Défaillance soudaine et complète

Défaillance par dégradation : Défaillance progressive et partielle

Etude de sécurité : Document qui démontre que les dangers liés aux accidents d'une installation industrielle ont été identifiés et que des mesures nécessaires pour prévenir et limiter les conséquences sur les personnes, l'environnement et les biens ont été prises. L'étude de sécurité couvre notamment *les rapports de sécurité* évoqués dans la directive Seveso 3 (JOUE L 197, 2012), ainsi que les *études de dangers* des ICPE. Elle prend la forme d'une démarche systématique visant à identifier, analyser et évaluer les risques dans un contexte donné.

1 Introduction

1.1 Contexte et enjeux

Certaines installations industrielles utilisent des produits, des procédés ou des systèmes faisant peser un risque sur la population, l'environnement ou les biens. La maîtrise de ces risques nécessite l'utilisation de méthodes et de moyens adaptés lors des phases de conception, d'exploitation ou de maintenance. En particulier, l'évaluation des risques est menée soit pour répondre à un besoin d'amélioration de la sécurité, soit pour démontrer le respect d'une exigence réglementaire afin d'obtenir l'autorisation d'exploiter de la part d'une autorité de contrôle.

L'évaluation des risques nécessite la mise en œuvre de différents outils et méthodes pour, entre autres, identifier des scénarios, évaluer la probabilité ou la gravité d'événements redoutés, ou bien évaluer la performance de mesures de sécurité. Ces méthodes, qui sont adaptées aux technologies matures, pour lesquelles les connaissances sont bien établies rencontrent des obstacles lors de leur application pour maîtriser les risques causés par l'exploitation de *nouvelles technologies*¹.

C'est en particulier le cas pour l'évaluation de la probabilité des événements redoutés pour lesquelles les données de retour d'expérience peuvent être peu nombreuses, la connaissance sur les causes et mécanismes de défaillances lacunaires et le recul insuffisant pour caractériser le vieillissement, c'est-à-dire dans ce contexte, l'évaluation de la probabilité des événements au cours du temps.

L'objectif de ce travail est de souligner les particularités des nouvelles technologies et de proposer des pistes de réflexion et d'amélioration de la maîtrise des risques industriels au regard de deux points spécifiques que sont : la *quantification probabiliste* dans le cadre du management des risques et la *prise en compte de leur vieillissement*.

Dans le cadre du management des risques d'un système, la quantification probabiliste repose généralement sur la valorisation de données issues du retour d'expérience ou sur l'utilisation de sources de données représentatives de la configuration étudiée.

Dans la mesure où les nouvelles technologies sont caractérisées par l'absence de données de fiabilité et de probabilité, les approches usuelles de quantification probabiliste ne sont pas envisageables. Des solutions doivent donc être développées pour pallier le manque de données, telles que le développement de méthodes d'acquisition de données ou l'utilisation de nouvelles méthodes de modélisation des probabilités d'événements en lien avec les systèmes.

En ce qui concerne la gestion du risque de vieillissement, la méconnaissance de l'évolution à venir de l'état des systèmes composés de nouvelles technologies est un frein à l'application des méthodes utilisées habituellement pour les technologies matures.

Puisqu'il s'agit ici d'une problématique s'inscrivant dans un contexte plus large, la réflexion sur la prise en compte du vieillissement des nouvelles technologies pourra couvrir à la fois le dimensionnement des installations lors de la conception, les besoins de modélisation de la dégradation des systèmes, l'application de mesures techniques et organisationnelles de suivi et de maîtrise du vieillissement ou bien la priorisation des actions selon la criticité des scénarios.

¹ Dans le cadre de ce rapport, on désigne par nouvelle technologie ou technologie émergente toute technologie ayant fait l'objet de développements scientifiques ou techniques récents et pouvant être mise en œuvre comme – ou associée à – des moyens de production industriels critiques pour la sécurité. Il s'agit particulièrement de systèmes pour lesquels on ne dispose pas de données qualitatives ou quantitatives issues de leur exploitation pouvant être utilisées pour caractériser leur fiabilité. A titre d'exemple, on cite les composants conçus pour produire, distribuer ou stocker de l'hydrogène-énergie gazeux ou cryogénique, ou bien des moyens de stockage électro-chimiques.

A ce jour, pour des raisons de simplification, la quantification probabiliste des analyses de risques considère parfois (notamment pour l'étude de dangers) que la probabilité d'occurrence d'un scénario est constante dans le temps et est moyennée sur une période (généralement ramenée à 1 an). La réflexion autour de la prise en compte du caractère dynamique et évolutif des probabilités de défaillances que cela soit par des méthodes de modélisations dynamiques ou bien au travers de mesures organisationnelles de surveillance et de maintenance des installations conduit à s'interroger sur l'adéquation des données et des modèles utilisés pour la quantification. Cet axe constitue alors le trait d'union entre les limites de la quantification probabiliste des analyses de risques et la prise en compte du vieillissement.

De ces considérations, il ressort que les nouveaux systèmes représentent un point sensible et peuvent constituer une source d'erreurs ou d'incertitudes sur les résultats d'analyses de risques conduisant à une mauvaise maîtrise du risque industriel.

Le présent document propose donc de réaliser un état de l'art des méthodes de quantification probabilistes applicables aux analyses de risques ainsi que des méthodes de gestion du risque de vieillissement. En posant le cadre de réflexion constitué par les nouvelles technologies appliquées aux systèmes industriels critiques pour la sécurité, les méthodes présentées sont mises en perspective au regard de leur applicabilité et de leurs contraintes de mise en œuvre.

Il s'adresse particulièrement aux spécialistes des analyses de risques industriels, aux industriels exploitants d'installations, ainsi qu'aux fournisseurs de structures, d'équipements ou de barrières de sécurité à même d'être déployés au sein de ses installations. Selon leur degré d'expertise, ce document a pour ambition de les sensibiliser aux différentes méthodes d'évaluation quantitative probabilistes et à la prise en compte du vieillissement. Toutefois, il ne constitue pas un guide opérationnel permettant à lui seul la mise en place des méthodes présentées et, le cas échéant, il devra être complété par d'autres sources d'informations.

1.2 Plan et contenu

Afin de donner les clés de lecture nécessaires à la bonne compréhension des outils et méthodes présentés dans le document, dans une première partie (Chapitre 2), sont exposés les principes généraux du management des risques, de la quantification probabiliste et de la prise en compte du vieillissement.

Ensuite, partant du constat du besoin de données quantifiées lors de l'évaluation des risques, la deuxième partie (Chapitre 3) présente les méthodes de collectes de données que sont l'analyse des bases et recueils de données, la collecte de données terrain, l'élicitation d'avis d'experts et la mise en œuvre d'essais de fiabilité.

La troisième partie est constituée des chapitre 4 et 5. Le chapitre 4 présente des méthodes de modélisation des probabilités d'événements basées sur des modèles statistiques, stochastiques ou physiques. Le chapitre 5, quant à lui, détaille les approches de pondération des données probabilistes qui reposent sur les statistiques fréquentistes ou bayésiennes, la physique ou bien des modèles qualitatifs comme le jugement d'experts.

Enfin, la quatrième partie (Chapitre 6) traite des méthodes d'évaluation des risques pour le suivi des équipements et la maîtrise de leur vieillissement. Elle détaille les méthodes et les réflexions pour les composants passifs et actifs, ainsi que pour les technologies matures et émergentes. Les problématiques de lien entre les approches de suivi du vieillissement des équipements / structures et les études de dangers sont également mises en avant. Pour conclure, une ouverture sur les perspectives de travail possibles est présentée afin de répondre aux besoins que posent les technologies émergentes.

Il est à noter que les méthodes présentées ici correspondent à l'état de l'art des approches rencontrées par l'Ineris. Les méthodes innovantes, peu développées ou en développement dans le cadre de travaux de recherche récents, ne sont pas nécessairement présentées.

Également, ce rapport méthodologique pourra faire l'objet d'une suite afin de décrire des cas d'applications précis tels que l'hydrogène-énergie ou le stockage électrochimique pour lesquels il existe une incertitude importante lors de la quantification probabiliste des accidents associés.

2 Eléments de méthodologie générale pour la quantification probabiliste

Ce chapitre a pour vocation de présenter les principes généraux de l'analyse et du management des risques, de la quantification probabiliste, ainsi que de la gestion des risques liés au vieillissement. Il a pour objectif de fournir les clés de lecture nécessaires à la compréhension des chapitres suivants, sans pour autant avoir l'ambition d'être exhaustif. Il couvre plusieurs concepts et définitions relatifs aux méthodes d'analyse de risque, à la sûreté de fonctionnement, à la quantification probabiliste, aux détériorations et défaillances des systèmes et à la gestion du vieillissement.

2.1 Le management des risques

Ce paragraphe présente plusieurs notions relatives au management des risques (cf. NF ISO 31000, 2018 et NF EN IEC 31010, 2019) et à la quantification probabiliste. Il décrit ses objectifs, sa mise en œuvre ainsi que les données utilisées.

2.1.1 Le processus de management du risque

Le processus de management du risque, tel que décrit dans la norme NF ISO 31000 : 2018 est un processus itératif constitué d'une succession d'étapes visant, dans le contexte de ce rapport, à maîtriser les risques industriels.

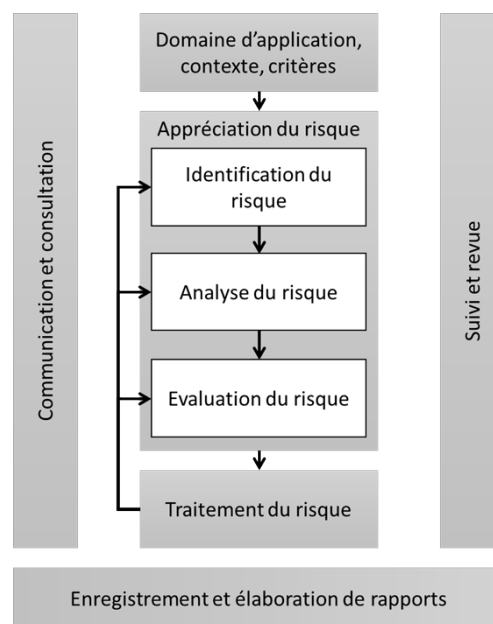


Figure 1 : Processus de management du risque (adapté de la norme NF ISO 31000 : 2018)

Outre les activités liées à la communication et consultation, au suivi et revue et à l'enregistrement et l'élaboration de rapports, le processus de management est composé de 3 grandes étapes ordonnancées.

1. **Domaine d'application, contexte, critères** : cette première étape a pour objectif d'adapter le processus de management du risque en permettant une appréciation du risque efficace et un traitement du risque approprié. Il s'agit de définir, entre autres :
 - le périmètre d'application : dans le cas présent, l'évaluation des risques posés par les activités économiques des entreprises, telles que la production, le stockage, le transports..., mais aussi de définir, les objectifs de l'analyse, les résultats attendus de chaque étape, le temps, les ressources, les outils et techniques, etc. ;
 - le contexte : c'est-à-dire l'environnement industriel de l'entreprise interne comme externe sur lequel le processus est mis en œuvre ;

- les critères du risque : c'est-à-dire le niveau et le type de risque, ainsi que les métriques d'évaluation de l'importance du risque. Ils prennent, en général, la forme d'un couple probabilité d'occurrence / gravité des conséquences.
2. **Appréciation du risque** : cette seconde étape correspond au processus global d'identification, d'analyse et d'évaluation du risque.
- **Identification du risque** : elle a pour but de chercher, reconnaître et décrire les risques en prenant en compte plusieurs facteurs tels que les causes, les événements, les conséquences et les éventuels biais et hypothèses. A cette fin, plusieurs techniques peuvent être employées comme le brainstorming, les entretiens et enquêtes, l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leur Effets et de leur Criticité), l'HAZID (Hazard Identification), l'HAZOP (Hazard and Operability Analysis), l'APR (Analyse Préliminaire du Risque), etc. Dans le cadre des applications envisagées, les accidents correspondent, par exemple, à des fuites de produits toxiques ou inflammables, des explosions, des incendies, ou des pannes d'équipements critiques ;
 - **Analyse du risque** : elle a pour objectif de comprendre la nature du risque et ses caractéristiques. Elle implique la prise en compte de la source du risque, de ses conséquences (la gravité), de la vraisemblance (la probabilité) des événements et des scénarios, ainsi que les moyens de maîtrise du risque et leur efficacité. Elle peut considérer le facteur temps et les interconnexions entre les différents événements (cause / conséquence). Différents outils peuvent être mis en œuvre tels que les AMDEC, les HAZOP, les nœuds papillons, les arbres de défaillances, les arbres d'événements, les LOPA (Layer Of Protection Analysis), les réseaux bayésiens, les chaînes de Markov, les simulations de Monte-Carlo, etc. ;
 - **Evaluation du risque** : elle consiste à comparer les résultats de l'analyse du risque aux critères de risque établis afin de déterminer l'action exigée. Cette dernière peut être de ne rien faire de plus, d'examiner les options de traitement du risque, d'entreprendre une analyse plus détaillée, de réexaminer les objectifs etc. Parmi les outils disponibles pour réaliser cette étape, on liste la méthode ALARP (As Low As Reasonably Possible), les diagrammes F-N (risque sociétal), la maintenance basée sur la fiabilité, les analyses coût / bénéfice ou bien les analyses par critères multiples ;
3. **Traitement du risque** : cette troisième étape a pour but de choisir et mettre en œuvre les options pour aborder le risque. Il est possible à cette étape de choisir parmi les options de refus du risque, c'est-à-dire l'interdiction d'exploiter en interne ou par l'autorité compétente, l'élimination de la source du risque par la modification du système ou de son environnement, la modification de ses composantes vraisemblance / conséquences – par exemple via la mise en œuvre de barrières de sécurité, l'acceptation du risque en l'état. Les outils permettant de traiter le risque sont, par exemple, les matrices d'acceptabilité, les diagrammes F-N, les nœuds-papillons, les LOPA...

La mise en œuvre de ces étapes successives permet d'apprécier le risque et de le maintenir à un niveau jugé acceptable pour les autorités de contrôle ainsi que pour l'exploitant.

Note : Nous proposons dans la suite de cette note de reprendre la terminologie de l'Omega 9 (Ineris, 2015) présentée au paragraphe 2.2.1 et donc de considérer que l'estimation de la vraisemblance est réalisée lors de la phase d'évaluation du risque.

2.1.2 L'estimation de la vraisemblance

Lors de l'étape d'appréciation du risque et plus particulièrement lors de l'étape d'évaluation, on cherche à évaluer la vraisemblance des événements identifiés au préalable. Il est à noter que cette évaluation peut être réalisée de manière qualitative ou quantitative, mais dans le cadre de ce rapport, c'est l'évaluation quantifiée qui est considérée.

Suivant le domaine d'application, on peut chercher à quantifier des *probabilités* d'occurrence par heure, par an, par opération, etc.

Une autre manière de quantifier la vraisemblance revient à évaluer la *fréquence*, c'est à dire le nombre de fois que l'événement se produira sur un temps donné. La période correspondant à l'intervalle de temps entre deux occurrences d'un événement est appelée la période de retour.

Pour des événements graves, il est plus judicieux d'évaluer la probabilité d'occurrence. C'est-à-dire la probabilité que l'événement se produise au moins une fois. Cette dernière doit nécessairement être très faible, par exemple être inférieure à 10^{-2} .

On propose les définitions suivantes.

Fréquence

La *fréquence* est définie ici comme le nombre moyen d'observations d'un événement sur une période, un nombre de cycles, une distance, un nombre d'opérations, etc. Son unité est l'inverse de l'unité considérée (an^{-1} , opération^{-1} ...) et l'inverse de la fréquence correspond à la période de retour moyen de l'événement. Dans une étude de dangers, la fréquence est exprimée en an^{-1} .

C'est généralement le type de données que l'on tire des recueils de données afin de quantifier l'occurrence d'événements à l'origine des scénarios accidentels.

Probabilité

La *probabilité* correspond à une grandeur adimensionnelle qui varie entre 0 et 1 et qui représente la vraisemblance d'occurrence d'un événement. Elle peut être associée à une distribution de probabilité (cf. annexe 1) qui modélise le caractère plus ou moins probable d'un événement selon l'évolution d'une variable telle que le temps ou le nombre de sollicitation d'un composant.

Dans le contexte de l'étude de dangers, la probabilité quantifie la vraisemblance de l'occurrence d'un événement sur une période d'un an.

2.1.3 Les données d'entrée utilisées

La fréquence ou la probabilité d'un événement indésirable est évaluée à partir des probabilités des différents événements menant à cet événement indésirable. Les événements de base sont généralement des défaillances d'équipements, des erreurs opératoires ou des agressions externes. Le présent document porte principalement sur les défaillances d'équipements. Ce paragraphe donne quelques caractéristiques de ces défaillances et grandeurs permettant de les décrire.

2.1.3.1 Défaillances catalectiques et par dégradation

Il existe de nombreux critères pour classer les défaillances. On peut distinguer par exemple les défaillances catalectiques et les défaillances par dégradation.

Concernant les défaillances catalectiques, qui sont complètes et soudaines, il n'y a pas de mesure possible de détection de l'évolution de la dégradation dans le temps.

Concernant les défaillances survenant à la suite de dégradations qui sont progressives et partielles, il est envisageable de mesurer l'évolution de la dégradation dans le temps et de définir des niveaux de pseudo-défaillance à l'atteinte du seuil de dégradation défini au préalable comme étant critique. Parmi les méthodes disponibles pour analyser les résultats et en déduire des durées de vie, on peut citer notamment : la méthode par régression, la méthode de la trajectoire inversible, les différents processus (Gamma, Wiener...).

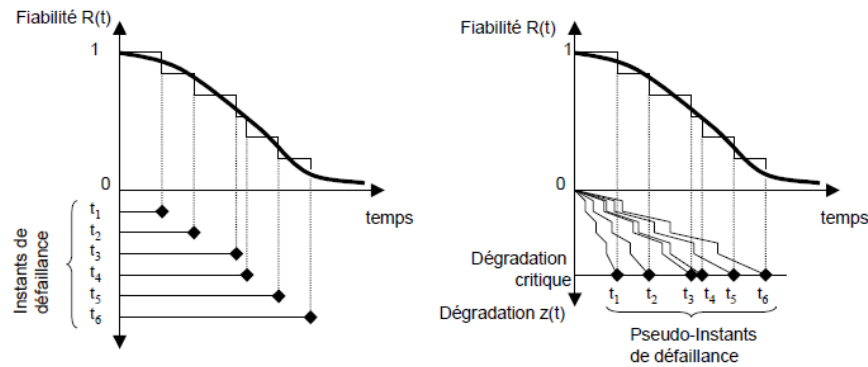


Figure 2 : Fiabilité de systèmes soumis à des défaillances catalectiques (gauche) ou à des dégradations (droite) (Delage, 2018)

2.1.3.2 Taux de défaillance et intensité inconditionnelle de défaillance

Derrière les notions de *fréquence* et de *probabilité*, sous-tendent deux autres grandeurs (ISO/TR 12489, 2013) que sont : le *taux de défaillance* d'un composant ou d'un système et son *intensité inconditionnelle de défaillance*. Le taux de défaillance représente la probabilité qu'un composant ou un système tombe en panne à un moment précis, en supposant qu'il a fonctionné correctement jusqu'à ce point. L'intensité inconditionnelle de défaillance représente le taux global auquel les pannes se produisent au fil du temps, indépendamment du fait que le composant fonctionnait auparavant ou non.

Taux de défaillance

Le *taux de défaillance* correspond à la limite du quotient de la probabilité conditionnelle qu'une entité tombe en panne entre t et $t + dt$ et de dt , lorsque dt tend vers 0, sachant qu'elle était en état de fonctionnement sur l'intervalle $[0, t]$. Pour les processus sans effet de mémoire, c'est-à-dire avec des taux de défaillances constants, il correspond à l'inverse du temps moyen avant défaillance. L'évolution du taux de défaillance au cours du temps est directement corrélée à l'évolution de la fiabilité. On note λ le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\mathbb{P}(T \leq t + dt \mid T > t)}{dt}.$$

En règle générale, dans les évaluations de risques, les systèmes sont considérés comme étant hautement disponibles et à taux de défaillances constants dans le temps. Par conséquent, on peut exprimer la probabilité que l'événement se produise sur une période donnée comme suivant :

$$- \mathbb{P}_{\text{continu}} = \lambda T ;$$

Avec $\mathbb{P}$: La probabilité de défaillance en mode continu ou à la sollicitation ; λ : le taux de défaillance ; T : le temps d'utilisation total.

Remarque : Il convient d'être vigilant sur l'unité dans laquelle est exprimée le taux de défaillance.

Intensité inconditionnelle de défaillance

L'*intensité inconditionnelle de défaillance* ou fréquence de défaillance $w(t)$ correspond à limite du quotient de la probabilité conditionnelle de défaillance d'une entité dans l'intervalle de temps $[t, t + dt]$, et dt , lorsque dt tend vers 0, sachant qu'elle était disponible à l'instant 0. Sous les mêmes hypothèses que précédemment, on peut exprimer la probabilité d'occurrence sur une période égale à un an en fonction de la fréquence annuelle :

$$P = 1 - e^{-f \times T}, \text{ avec } f \text{ la fréquence annuelle équivalente à } w(t) \text{ et } T = 1 \text{ an la durée pendant laquelle l'événement peut se produire. Pour de très faibles valeurs (i.e. } f < 10^{-1}), \text{ la relation peut s'écrire : } P = f \times T.$$

Ainsi, par simplification, le lien est fait entre la probabilité et la fréquence lors de l'évaluation des risques.

2.1.3.3 Taux de défaillance non constant dans le temps

Les sources de données proposent des fréquences qui sont constantes dans le temps et qui sont utilisées comme telles dans les évaluations probabilistes de risques. L'hypothèse du taux de défaillance constant dans le temps est également souvent appliquée dans les études de sûreté de fonctionnement. Cette hypothèse ne considère pas que certains modes de défaillances se produisent plutôt en début de vie du composant (défauts de fabrication ou d'installation par exemple), et d'autres plutôt après un long temps d'utilisation (par exemple à cause du vieillissement ou de l'usure). Ainsi, l'occurrence de l'ensemble des modes de défaillance est lissée sur la durée d'utilisation. Cette hypothèse a l'avantage de simplifier les calculs et peut se justifier si on estime que l'on met en place les mesures adéquates pour détecter ou éviter les défaillances de jeunesse et maîtriser les défaillances dues au vieillissement. Cependant, cette hypothèse peut être trop simpliste et présenter un écart important avec la réalité. Un modèle plus juste de représentation de la fiabilité d'un composant est le modèle de la courbe en baignoire.

Trois phases y sont distinguées. Lors de la phase I, le taux de défaillance décroît dans le temps. Cela correspond à une amélioration de la fiabilité du système qui s'explique par une période de rodage ou de déverminage² lors de laquelle des défauts liés à la conception, à la fabrication ou même à l'utilisation vont être détectés au début de la mise en service d'un système.

La phase II correspond à la période de vie utile. Le taux de défaillance est considéré comme étant constant. Cette hypothèse est communément appliquée aux dispositifs électriques et électroniques. En revanche, pour les systèmes soumis à des mécanismes de dégradation non négligeables sur la période de temps considéré (usure, corrosion...), on ne pourra pas modéliser de phase II avec un taux de défaillance constant dans le temps sur l'ensemble de la durée de vie (e.g. lorsque la surépaisseur est trop dégradée).

Enfin, la phase III représente le vieillissement du système. Le taux de défaillance est une fonction croissante dans le temps.

Il est d'usage d'utiliser un taux de défaillance constant pour modéliser la période de vie utile d'un composant électronique ou électrique et un taux de défaillance non constant pour modéliser la période de vie utile d'un composant mécanique. Ce choix relève d'une hypothèse simplificatrice qui considère que les mécanismes d'endommagement ne sont pas prépondérants dans l'occurrence de la défaillance de composants électriques ou électroniques. En réalité, tous les composants sont bel et bien soumis à des phénomènes de dégradation dépendant du temps. Le modèle de gauche qui reste souvent adopté pour simplifier les calculs est donc un modèle théorique.

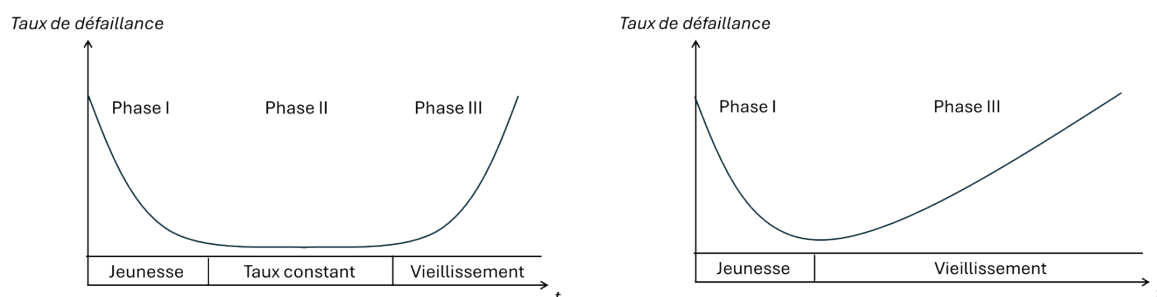


Figure 3 : Modèles de la courbe en baignoire – composants électriques / électroniques (à gauche), composants mécaniques (à droite)

En pratique, la loi de Weibull à trois paramètres permet de représenter les différentes phases de vie d'un système.

² Déverminage : Procédure utilisée dans le domaine de la fiabilité des produits pour détecter et éliminer les défauts initiaux d'un système, d'un composant ou d'un équipement avant sa mise en service ou sa commercialisation. L'objectif principal est d'améliorer la fiabilité à long terme en identifiant et éliminant les défaillances précoces.

$$f(x;k,\lambda,\theta) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x-\theta}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-\theta}{\lambda} \right)^k}$$

Avec, $k > 0$ le paramètre de forme, $\lambda > 0$, le paramètre d'échelle et θ le paramètre de position.

- si le facteur $k < 1$, alors on modélise un taux de panne décroissant ;
- si le facteur $k = 1$, alors on modélise un taux de panne constant ;
- si le facteur $k > 1$, alors on modélise un taux de panne croissant.

Si le taux de défaillance d'un système peut croître dans le temps pour des raisons intrinsèques, notamment à cause de l'usure ou du vieillissement, sa fiabilité peut également évoluer du fait de changements liés à son utilisation, à sa maintenance ou à son environnement.

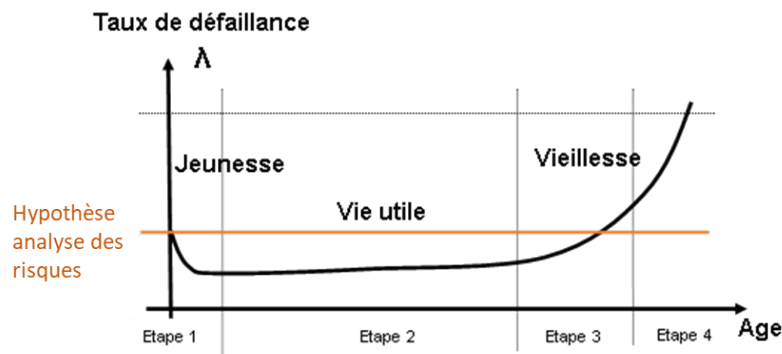


Figure 4 : Modèle de la courbe en baignoire et hypothèse de l'évaluation des risques

Par conséquent, pour certains systèmes, l'hypothèse simplificatrice d'un taux constant dans le temps lors des calculs de probabilité de défaillance peut se révéler abusive. Cela nous conduit donc à nous questionner sur le besoin d'une meilleure prise en compte de ces phénomènes évolutifs dans la caractérisation et la maîtrise des risques industriels.

2.1.3.4 Censures

En pratique, lors de la collecte du retour d'expérience quantifié ou d'essais à l'origine des données utilisées pour la quantification probabiliste dans le cadre d'une évaluation des risques, il n'est pas toujours possible d'observer les composants sur la totalité du temps d'utilisation jusqu'à la défaillance. On parle alors de *données censurées*. On recense 4 cas possibles :

- **censure à droite** : le matériel est en état de bon fonctionnement à l'issue de la fin de l'observation ;
- **censure à gauche** : l'observation a débuté après le début de la période d'utilisation ;
- **censure par intervalle** : le suivi du matériel est effectué seulement pendant une période du temps total d'utilisation ;
- **non-censurée** : la durée de suivi du matériel commence au début de son utilisation et s'arrête à l'observation de la défaillance.

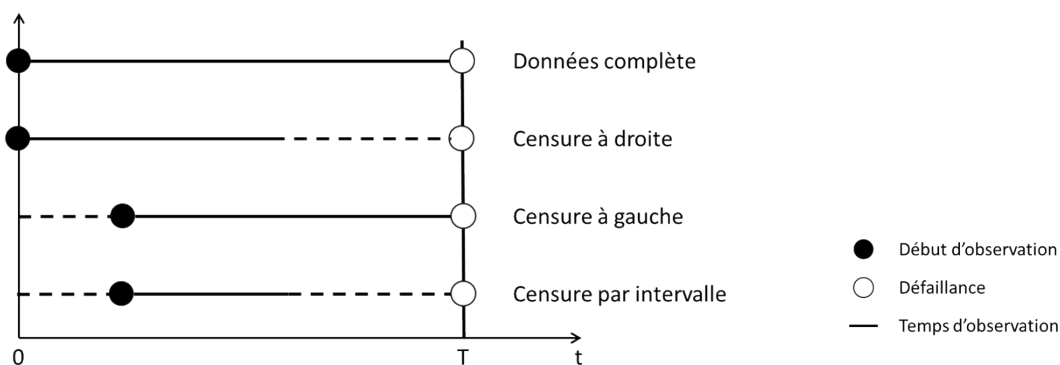


Figure 5 : Représentation graphique des différents types de censures

Un autre type de censure est lié aux tests effectués sur le matériel lorsque l'on cherche à en déterminer la probabilité de défaillance. On trouve 2 types de tests :

- **les tests censurés de type I** : on teste un nombre de matériels pendant un temps défini. L'ensemble des matériels qui n'ont pas subi de défaillance à l'issue du test sont censurés à droite ;
- **les tests censurés de type II** : on teste un nombre de matériels jusqu'à atteindre un nombre prédéterminé de matériels défaillants. Les matériels restants sont censurés à droite.

2.2 La quantification probabiliste dans les études de dangers

Ce paragraphe propose de placer le management des risques industriels dans le contexte plus restreint de l'étude de dangers (EDD). Il présente un certain nombre de notions couvrant ainsi le contexte réglementaire, les méthodes d'estimation et de calcul de la probabilité habituellement utilisées.

2.2.1 Le processus de l'étude de dangers

En France, tel que prévu par l'article L.181-25 du code de l'environnement, le demandeur d'une autorisation environnementale nécessaire à l'exploitation d'une installation classée pour la protection de l'environnement doit fournir une étude de dangers aux autorités. Cette étude donne lieu à un processus de management des risques tenant compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique et de la gravité des accidents potentiels selon une méthodologie qu'elle explicite. La Figure 6 présente un exemple de processus tiré de l'Omega 9.

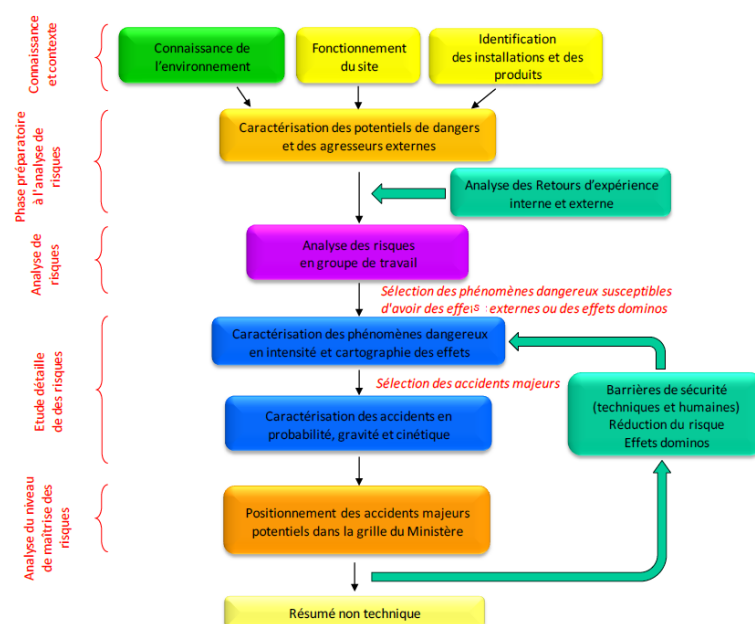


Figure 6 : Processus de réalisation d'une étude de dangers pour les installations classées (Ineris, 2015)

L'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 dit « *arrêté PCIG* » ainsi que l'arrêté ministériel du 26 mai 2014 relatif à la prévention des accidents majeurs dans les installations classées prescrivent que cette étude doit examiner et détailler les probabilités des accidents potentiels ainsi que justifier leur positionnement vis-à-vis de l'échelle de probabilité reprise au paragraphe 2.2.2 du présent rapport.

En complément, la circulaire du 10 mai 2010 récapitule plusieurs règles utiles à la définition de la probabilité dans le cadre des études de dangers.

L'évaluation du risque pour les scénarios d'accidents potentiels ainsi réalisée, il est possible de statuer sur leur acceptabilité en considérant la mise en œuvre de mesures de maîtrise de risque (MMR) existantes, et si nécessaire la mise en place de mesures de maîtrise des risques complémentaires.

2.2.2 Prise en compte de la vraisemblance dans les études de dangers

Comme évoqué précédemment, dans le cadre de la réalisation des études de dangers, les phénomènes dangereux susceptibles de conduire à un accident majeur doivent être caractérisés par leur probabilité d'occurrence. Cette probabilité correspond à la probabilité d'occurrence moyenne d'un accident sur une période d'un an.

L'objectif est alors d'évaluer la probabilité de chaque scénario d'accident majeur conformément à l'échelle des classes de probabilité fournie à l'Annexe I de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005, appelé « *arrêté PCIG* ». Ces classes vont de A (la plus probable) à E (la moins probable) et sont définies comme présenté à la Figure 7.

Pour aboutir à l'estimation de cette probabilité d'occurrence annuelle (POA), plusieurs types de données sont amenées à être utilisées dans le cadre des études de dangers.

- **Fréquences annuelles des événements initiateurs** (exprimés sous forme de valeurs ou de classes) ou des ERC (extraites de recueils de données) suivant la méthode choisie ;
- **Probabilités de défaillance à la sollicitation des mesures de maîtrise des risques** retenues pour l'évaluation probabilistes (exprimées sous forme de valeurs ou de niveaux de confiance équivalents à des classes de probabilité) ;

- **Probabilités conditionnelles des événements secondaires** (exemple : probabilité d'inflammation sachant l'occurrence d'un événement redouté) ;
- **Probabilités d'occurrence** des accidents majeurs des installations voisines susceptibles de générer des **effets dominos** sur les installations du système étudié.

Echelle de probabilité	E	D	C	B	A
Qualitative (si le REX est suffisant)	« événement possible mais non rencontré au niveau mondial » : n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles	« événement très improbable » : s'est déjà produit mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement la probabilité de ce scénario	« événement improbable » : un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité	« événement probable sur site » : s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie des installations	« événement courant » : se produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie des installations, malgré d'éventuelles mesures correctives
Semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte de la cotation des mesures de maîtrise des risques mises en place				
Quantitative (par unité et par an)		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²

Figure 7 : Échelle réglementaire relative à la détermination de la probabilité d'occurrence annuelle d'un phénomène dangereux (arrêté PCIG du 29 septembre 2005)

La phase d'estimation de la probabilité est décomposée en trois étapes :

1. **Le choix de la méthode d'estimation de la probabilité** : Cette dernière peut être quantitative, semi-quantitative ou bien qualitative.
2. **La collecte des données d'entrée** : Elle se fait notamment à partir de base de données quantifiées et de l'analyse du retour d'expérience.
3. **L'estimation de la probabilité** d'occurrence des phénomènes dangereux et des accidents qui peut inclure des étapes de représentations graphiques des scénarios et des calculs probabilistes.

2.2.2.1 Les méthodes d'estimation de la probabilité

L'approche qualitative se traduit par une estimation des fréquences réalisée sans faire intervenir de valeur, ni de calcul. Il s'agit d'estimer si ce type d'événement est : « extrêmement probable » ; « improbable » ; « probable » ; ... Le plus souvent, un retour d'expérience non chiffré est utilisé, comme par exemple, « l'événement » : « ne s'est jamais produit » ; « ne s'est pas produit sur le site, mais dans des installations similaires » ; « s'est déjà produit sur le site ». Cette approche se base principalement sur le retour d'expérience, les dires d'experts et les bonnes pratiques. Selon le formalisme de sa mise en œuvre notamment lors de l'élicitation de l'expertise, de fortes incertitudes peuvent peser sur les résultats. En pratique, l'approche qualitative est très rarement utilisée pour l'évaluation des risques d'accidents majeurs.

Pour *l'approche semi-quantitative*, la probabilité d'occurrence de l'accident est estimée sous forme de classe correspondant à un intervalle de probabilité (de A à E). Les données d'entrée qui caractérisent les événements initiateurs et les MMR sont des intervalles et les probabilités secondaires sont des ordres de grandeurs (puissances de 10). Les différentes règles de calculs sont présentées dans le rapport Omega 25 (*Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées*, Ineris, 2018).

Dans l'approche quantitative, les fréquences d'occurrence des événements initiateurs, les probabilités de défaillance à la sollicitation des MMR et les probabilités conditionnelles des événements secondaires sont des valeurs chiffrées. L'approche quantitative est recommandée lorsque l'on dispose de données fiables ou en présence d'enjeux importants car elle fournit les meilleurs résultats sans perte d'information (à l'inverse du traitement semi-quantitatif). La démarche quantitative est présentée en détail dans le rapport Omega 24 (*Probabilité dans les études de sécurité et études de dangers*, Ineris 2018).

La quantification peut se faire au niveau des événements initiateurs, au niveau des événements redoutés centraux ou directement au niveau des phénomènes dangereux. En fonction de la méthode de quantification retenue, les mesures de maîtrise des risques associées aux scénarios seront détaillées ou bien directement intégrées aux probabilités utilisées.

Finalement, dans tous les cas et pour chaque méthode d'estimation de la probabilité, la probabilité du phénomène dangereux est alors exprimée en classe de probabilité.

L'Omega 9 (*Etude de dangers d'une installation classée*, Ineris, 2015) qui synthétise les connaissances de l'Ineris en matière d'élaboration des études de dangers pour les installations classées fournit des éléments complémentaires sur la place de la probabilité dans les études de dangers.

2.2.2.2 Quantification lors de l'étude détaillée des risques : le nœud papillon

Dans le cadre des EDD, la quantification probabiliste se fait généralement sous la forme d'un nœud-papillon quantifié. Cette représentation d'accidents qui combine un arbre de défaillances et un arbre d'événements donne un aperçu global des scénarios menant aux accidents majeurs et met en évidence les liens logiques entre les différentes causes possibles ainsi que les MMR permettant de réduire leur probabilité d'occurrence.

Un nœud papillon se représente généralement sous cette forme.

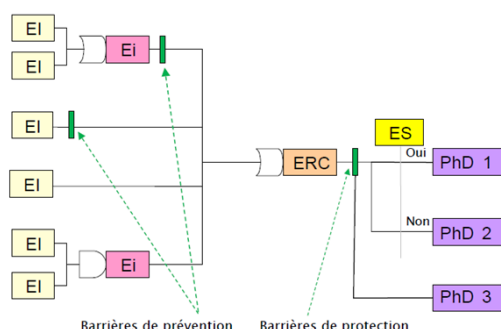


Figure 8 : Représentation graphique théorique d'un nœud papillon

Légende :

- **EI** : Événement initiateur, appelés causes de défaillance en sûreté de fonctionnement
- **Ei** : Événement intermédiaire
- **ERC** : Événement Redouté Central. Il s'agit généralement d'une perte de confinement
- **ES** : Événement Secondaire. Il peut s'agir d'une inflammation d'un nuage de gaz immédiate (et par exemple conduire à feu torche) ou retardée (et par exemple conduire à un UVCE).
- **PhD** : Phénomène Dangereux. Ils correspondent à des phénomènes tels que des explosions, des incendies, des dispersions toxiques.

Le nœud papillon fait apparaître trois typologies de MMR (ou barrières de sécurité) (cf. Circulaire 10/05/10) :

- **les mesures (ou barrières) de prévention** : mesures visant à éviter ou limiter la probabilité d'un événement indésirable, en amont du phénomène dangereux ;
- **les mesures (ou barrières) de limitation** : mesures visant à limiter l'intensité des effets d'un phénomène dangereux ;
- **les mesures (ou barrières) de protection** : mesures visant à limiter les conséquences sur les cibles potentielles par diminution de la vulnérabilité.

La quantification peut se faire principalement à deux niveaux : aux événements initiateurs, les fréquences sont ensuite agrégées et propagées le long du nœud papillon, ou bien directement au niveau de l'ERC.

Pour déterminer la valeur de ces données d'entrée, on utilise notamment des recueils de données génériques ou spécifiques qui contiennent des valeurs de fréquence.

2.2.2.3 Sources de données

Des sources de données fournissent des éléments permettant de calculer les fréquences d'occurrence annuelle. Les sources de données les plus utilisées dans le contexte des EDD sont les suivantes :

Sources de données	Evénements couverts
Handleiding Risicoberekeningen Bevi, (RIVM, 2020) – non traduit	EI, ERC
Failure rate and event data, (HSE, 2019)	EI, ERC
Handboek Risicoberekeningen, (RIVM, 2019) – non traduit	EI, ERC
Hazardous Material Release and Accident Frequencies for Process Plant Volume II (RELDAT) (Taylor, 2006)	EI, ERC, barrières
Fréquence des événements initiateurs d'accident (ICSI, 2009)	EI, ERC, barrières
Offshore and Onshore Reliability Data (OREDA) (SINTEF, 2015)	EI, ERC, barrières

Tableau 1 : Sources de données fréquemment utilisées lors de la quantification probabiliste de l'évaluation des risques

Les valeurs proposées par ces sources de données reposent sur l'observation d'un grand nombre de systèmes de natures différentes et de designs différents, parfois exploités dans des conditions très variables (secteurs des procédés en général) et pendant un temps long (plusieurs dizaines d'années). Elles affichent directement des fréquences de défaillance ou bien des taux de défaillance qui recouvrent plusieurs causes de défaillances pouvant être des causes intrinsèques ou extrinsèques liées : au design, au montage, à l'exploitation, à la maintenance, à l'environnement ou aux exploitations environnantes ou bien à des phénomènes de dégradation.

Bien que les hypothèses sous-jacentes considèrent un taux de défaillance constant dans le temps sur une période de vie utile, l'observation sur un temps long permet aussi de tenir compte des défaillances liées à des phénomènes d'usure ou de vieillissement.

Le rapport *Panorama des sources de données utilisées dans le domaine des analyses quantitatives des risques* (Ineris, 2021) liste l'ensemble des sources de données dont l'Ineris a connaissance pour quantifier les probabilités des études de dangers. En complément, le rapport *Hiérarchisation des bases de données génériques* (Ineris, 2015) propose une méthode d'évaluation de la qualité d'une base de données et de son adéquation au contexte d'utilisation qui peut être utilisée pour justifier l'utilisation d'une source de données, mais aussi pour comparer deux sources de données vis-à-vis d'une installation étudiée ou bien pour souligner les forces et les faiblesses de la source de données.

2.3 La maîtrise du vieillissement

Ce paragraphe présente les principes généraux de l'évaluation et de la maîtrise des risques liés au vieillissement des structures et des systèmes constitués de composants de mécaniques, électriques, électroniques.

2.3.1 Introduction et généralités sur la maîtrise du vieillissement

2.3.1.1 Principales définitions

Le vieillissement

Le vieillissement est un phénomène continu et progressif qui dépend bien souvent d'un grand nombre de covariables influentes telles que le temps de fonctionnement, les chargements appliqués, les

propriétés des matériaux, le régime d'exploitation, etc... Il se traduit par une altération des performances due à un ou plusieurs mécanismes de dégradation physiques ou chimiques propres au matériel et aux matériaux qui le constituent et à ses conditions d'environnement (Ineris, 2009).

Dans son sens large, le vieillissement peut également être provoqué par d'autres causes technologiques, sociales ou économiques, telles que : des performances inférieures à celle de nouveaux matériels plus modernes, le dépassement vis-à-vis du progrès technique, l'incompatibilité ou l'obsolescence, le manque de pièces de rechanges, la limite de rentabilité, l'évolution de la réglementation, l'évolution du profil de fonctionnement...

La durée d'exploitation réelle d'un matériel ou d'une installation va donc dépendre de ces différentes considérations techniques, économiques et réglementaires.

Le vieillissement est donc une notion négative qui conduit inéluctablement à la cessation de fonction d'une entité. C'est pourquoi, dans le domaine industriel, on s'intéresse à la durée de vie d'un équipement, à sa durabilité.

Dans le cadre de ce travail, nous pouvons retenir la définition du vieillissement suivante : processus par lequel les caractéristiques d'un système, structure ou composant se modifient graduellement avec le temps ou l'utilisation (Ineris, 2009).

A noter que dans le cadre de ce rapport, nous nous intéressons exclusivement aux modifications / détériorations à même de conduire à une perte d'intégrité des systèmes importants pour la sécurité (installations, équipements, barrières de sécurité) et pouvant être à l'origine de l'occurrence d'un accident industriel.

La maîtrise du vieillissement

Pour maîtriser le vieillissement d'une installation industrielle, il est indispensable d'identifier les principaux facteurs de vieillissement, de les détecter, de les évaluer et les hiérarchiser et de prendre les mesures nécessaires afin de les atténuer ou de les différer voire les supprimer.

La maîtrise du vieillissement passe par la maîtrise de la durabilité de l'équipement. Cette dernière consiste à estimer les durées de vie des équipements. Pour ce faire, il est nécessaire de bien connaître les mécanismes de détérioration qui l'affectent, les conditions environnementales de l'équipement (conditions de process, environnement, agressions physiques ou chimiques...), ainsi que les fréquences et natures des actions d'inspection et de maintenance conduisant au remplacement de tout ou partie des équipements. Du point de vue de l'évaluation et de la gestion des risques industriels, la maîtrise du vieillissement a pour conséquence de chercher à maintenir les **probabilités d'occurrence et les conséquences d'un accident dû au vieillissement à des niveaux constants préalablement établis.**

La durée de vie

La durée de vie réelle est malheureusement une notion post mortem. On ne connaît réellement la durée de vie que lorsqu'une défaillance majeure irrémédiable est survenue. Ce cas se rencontre rarement dans la pratique puisque l'on cherche à éviter cette situation et que généralement c'est l'optimisation technico-économique qui décide de la durée de vie.

Dans la maîtrise du vieillissement, on cherche à déterminer **la durabilité**³, qui est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données d'usage et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint. Cet état limite peut être caractérisé par la fin de sa vie utile, par son inadaptation pour des raisons techniques et économiques ou pour d'autres raisons pertinentes.

Outre la durée de vie réelle post mortem, période qui va de la fabrication à la réforme, on peut distinguer plusieurs durées de vie :

- **la durée de vie nominale** ou **durée de vie intrinsèque** ou **durée de vie prévue à la conception** lors du dimensionnement, qui est la période pendant laquelle il est prévu qu'un système, une structure ou un composant fonctionnera dans les limites d'acceptabilité ;

³ La durabilité est à distinguer de l'endurance qui correspond à la robustesse d'un appareil et sa capacité de fonctionner normalement pendant toute sa durée de vie indépendamment de sa maintenance. C'est donc une caractéristique technique intrinsèque à l'appareil.

- **la durée de vie résiduelle** ou **durée de vie restante**, période qui va d'un moment déterminé jusqu'à la réforme (l'arrêt, la remise à neuf ou le renouvellement) d'un système, structure ou composant ;
- **la durée de vie technologique** : à cause de l'obsolescence des composants, il n'est plus possible de maintenir l'installation, de remplacer des équipements ; on parle alors de vieillissement technologique ;
- **la durée de vie réglementaire**, qui correspondrait au moment où une autorité interdirait la poursuite de l'exploitation, cette durée de vie est fonction de l'état technique, des conditions d'exploitation-maintenance, et du référentiel de sûreté / sécurité national ;
- **la durée de vie technico-économique** : au-delà d'un certain seuil, les investissements complémentaires nécessaires peuvent ne plus pouvoir être amortis dans le futur, ou le risque industriel peut être trop important ; c'est généralement ce critère qui décidera de l'arrêt ou de la fin de vie d'une installation ou de ses matériels.

En complément de ces définitions, le lecteur pourra se référer à l'annexe 2 qui présente plusieurs définitions de concepts qui viennent compléter les notions abordées dans ce chapitre.

2.3.1.2 Les catégories de systèmes et composants : Composants actifs et passifs

Sur le plan de la maîtrise du vieillissement dans les installations industrielles, on va distinguer les composants *actifs* et les composants *passifs*.

Les **matériels actifs** auront davantage tendance à suivre des programmes de maintenance préventive, afin de maintenir un taux de défaillance sensiblement constant, la fin de vie étant alors inattendue, soudaine et complète. Ils font généralement l'objet d'une **approche dite fiabiliste ou statistique du vieillissement**. La défaillance de ces éléments entraîne généralement des risques humains, environnementaux ou économiques moindres. A titre d'exemple, les méthodes de maintenance préventive basées sur la fiabilité sont les plus souvent utilisées pour ces matériels.

Il s'agit de systèmes électroniques, électriques ou mécaniques composés d'éléments d'usure, tels que :

- les appareils de contrôle et l'instrumentation (capteurs de niveau, de pression, de température...), ainsi que leurs composants (relais, composants électroniques, condensateurs, résistances, cartes électroniques...), le matériel informatique et les systèmes de télécommunication... ;
- les équipements avec des pièces en mouvements et leurs composants (pompes, compresseurs, turbines, moteurs, vannes, joints, sièges, roulements...) ;
- les utilités (groupe électrogène, onduleur...) ;
- ...

Les **matériels passifs** vont avoir plutôt tendance à vieillir naturellement et se dégrader plus ou moins rapidement en fonction des phénomènes physiques dominants qui les affecte. Ils sont inspectés ou surveillés régulièrement. Ces matériels font généralement l'objet d'une **approche dite physique du vieillissement**. Il s'agit généralement des parties mécaniques de l'équipement ou du génie civil (enveloppe des ESP, colonnes, supports de tuyauterie...). A titre d'exemple, les méthodes d'inspection basées sur le risque ou des évaluations mécano-fiabilistes sont utilisées pour ces matériels.

On retrouvera notamment dans cette catégorie les structures au sens large, telles que :

- les équipements de confinement primaires (réservoirs, colonnes, corps de vanne, tuyauterie, canalisations...) ;
- les structures ou équipement de confinement secondaire (bacs de rétention, double enveloppe etc...) ;
- les structures de supportages (rack, estacades, fondations etc...) ;
- ...

Il est important de noter que l'analyse de ces deux visions du vieillissement nécessite un retour d'expérience. Le retour d'expérience apparaît donc comme un élément stratégique incontournable dans la maîtrise du vieillissement des installations industrielles.

Pour les composants actifs à courte et moyenne durées de vie (relais, contrôleurs, flexibles, joints d'équipements...), les informations sur le vieillissement peuvent être obtenues à partir de l'expérience d'exploitation, y compris les informations sur les défaillances et la maintenance.

Pour les pièces structurelles et les composants passifs à longue durée de vie (réservoirs, tuyaux, câbles, structures), il n'y a pas nécessairement de maintenance préventive ou corrective planifiée, et les informations sur le vieillissement se présentent généralement sous la forme de données de dégradation provenant de programmes de surveillance et d'inspection.

2.3.1.3 Détermination de la fiabilité : composants actifs électroniques et mécaniques

Pour déterminer la fiabilité d'un système actif, qu'il soit électronique, mécanique ou autre, il est essentiel de connaître la loi de fiabilité de ses composants. Cette tâche est souvent plus simple pour les systèmes électroniques que pour les systèmes mécaniques en raison de la complexité de leur structure statique et dynamique.

Dans un système électronique, chaque composant exerce une influence significative sur la fiabilité globale du système. La fiabilité du système est donc déterminée en fonction de la fiabilité de tous ses composants, et en supposant que les taux de défaillance sont constants dans le temps. Cette hypothèse, généralement valide pour la plupart des composants, simplifie les calculs. Les taux de défaillance des composants peuvent être déterminés à partir de modèles disponibles dans des recueils de données, de tests effectués sur les composants ou de données d'exploitation des produits.

En revanche, la fiabilité d'un système mécanique dépend principalement de quelques composants critiques (parfois un seul) qui sont responsables des dysfonctionnements. Ces composants exercent une influence quasi totale sur la probabilité de défaillance du système, tandis que les autres composants peuvent être considérés comme ayant une probabilité de défaillance négligeable. L'identification de ces composants critiques se fait par des analyses qualitatives, telles que l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) et l'Analyse de Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), ainsi que par des analyses quantitatives, comme l'analyse par arbres de défaillances.

2.3.1.4 Différentes approches de la défaillance par dégradation

On entend par mécanisme de défaillance, le processus physique ou chimique ayant entraîné une défaillance. Il est mis en évidence par une analyse du composant dégradé ou défaillant.

Le mode de défaillance, quant à lui, correspond à l'effet par lequel une défaillance est observée sur un élément du système.

Dans le cas d'une défaillance de vieillissement par dégradation, les mécanismes de dégradation sont de natures variées et les phénomènes associés sont souvent complexes à appréhender. Ils dépendent notamment :

- du type de composant : s'il s'agit d'un dispositif mécanique, électrique ou électronique ;
- des caractéristiques des matériaux (limites élastiques, limites de ruptures, limites d'endurance, de fatigue, dureté, susceptibilité à la corrosion...) ;
- des caractéristiques dimensionnelles (géométrie, épaisseur...) ;
- des sollicitations extérieures (température, humidité) ou liées au systèmes (pression, température, corrosion...).

Dans une approche « statistique » de la défaillance, on peut considérer une forme prédéfinie d'évolution du taux de défaillance, souvent supposé constant et généralement issue d'une évaluation statistique des défaillances enregistrées sur le composant (ou essais) indépendamment de l'origine de la défaillance (défaillance catalectique ou par dégradation). Pour ces équipements, la dégradation n'est pas évaluée, on estime la durée de vie par rapport aux défaillances dans une population similaire ou par essais. Cette durée correspond à une probabilité de défaillance acceptée sur un temps donné (en considérant le taux de défaillance constant par exemple). Ces méthodes font apparaître les notions de :

- MTBF (Mean Time Between Failure) : il s'agit du temps moyen entre deux défaillances réparables ;
- MTTF (Mean Time To Failure) : il s'agit du temps moyen de bon fonctionnement, ou temps moyen avant défaillance non réparable.

Ces approches sont principalement utilisées pour les composants actifs et les systèmes complexes, pour lesquels on privilégie la maintenance préventive, la redondance ou la maintenance corrective (réparation) selon la conséquence associée à la panne.

Dans une approche « physique » de la défaillance, selon la définition donnée par le HSE dans le document Plant Ageing (HSE, 2012), on s'intéresse à représenter l'évolution de la dégradation, et donc du taux de défaillance dans le temps. Généralement utilisée pour les structures, voire les composants mécaniques, on distingue trois phases de dégradation principales (cf. Figure 9) :

- une **période de rodage** (étape 1) où la dégradation peut progresser rapidement si les matériels ne sont pas adaptés (défaut de dimensionnement, de conception, de fabrication, d'installation).
- une **période d'amorçage** ou de maturité (étape 2). Dans cette phase, l'équipement a un comportement prévisible, sûr et il est supposé avoir un taux de défaillance faible et à peu près constant et peu de problèmes nécessitant une attention particulière. Son fonctionnement s'effectue dans les limites de son design ;
- une **période de propagation** ou de vieillissement qui peut aller jusqu'à la rupture (étape 3 et 4), l'équipement a atteint un certain niveau de dégradation, et sa vitesse de dégradation augmente.

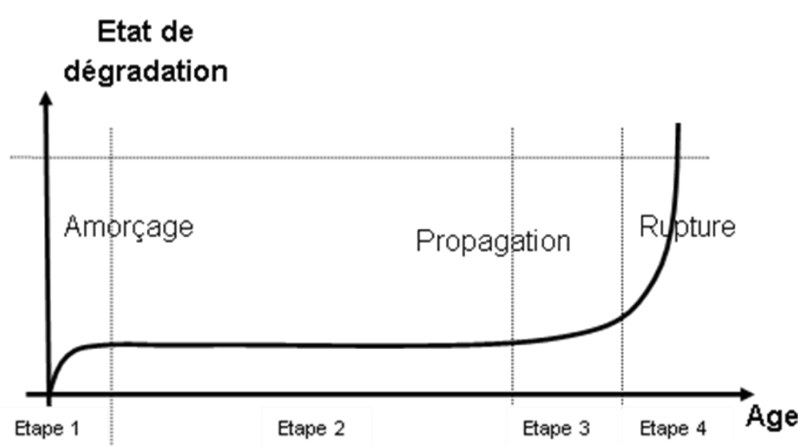


Figure 9 : Evolution physique de la dégradation d'un composant

La problématique est différente à chaque étape :

- En rodage, il est nécessaire de sécuriser l'exploitation et d'observer l'apparition de dégradation. Au cours de cette période, les matériels les plus fragiles, présentant des défauts ou non adaptés, seront éliminés. Le taux de défaillance des équipements est décroissant durant cette période.
- Lors de la période d'amorçage ou de maturité, l'inspection doit permettre de vérifier les hypothèses d'absence ou de propagation maîtrisée de la dégradation. Il faudra alors concentrer les efforts dans les zones les plus à risque d'évolution. Le taux de défaillance est globalement constant durant cette période.
- Lors de la période de propagation, un suivi précis doit être réalisé, par inspection, surveillance, modification du process ou de l'environnement jusqu'à maintenance ou réforme. Le taux de défaillance est croissant durant cette période.

Ces approches sont principalement utilisées pour les équipements mécaniques ou les structures. Pour les équipements ou structure dégradée, la problématique principale concerne l'optimisation de la maintenance conditionnelle ou l'inspection en service pour maîtriser le risque de défaillance.

L'identification des mécanismes de dégradation nécessite une connaissance fine des phénomènes physiques et chimiques. Les physiques ou statistiques des dégradations liées à ce mécanisme sont nécessaires pour connaître leurs processus d'amorçage de défaut puis de propagation, de les détecter et d'anticiper leur évolution.

2.3.2 La prise en compte de la dégradation : gestion « physique » du vieillissement

Le principal problème de l'évaluation qualitative de la dégradation est qu'elle demande beaucoup de temps et de ressources. Les principales difficultés de la maîtrise du vieillissement dans ce cas sont :

- l'exhaustivité de la liste des facteurs de stress et du mécanisme de vieillissement potentiel, notamment pour des équipements mal connus (de par leur nature, le process ou leur environnement) et peu exploités jusqu'à présent dont le retour d'expérience en exploitation est inexistant ou très faible ;
- la grande quantité d'informations à obtenir, qualifier et analyser ;
- les compétences nécessaires pour chacun des domaines de la gestion du vieillissement.

La gestion du vieillissement d'un équipement, d'un composant mécanique ou d'une structure (plus généralement appliquée à ces dernières) comprend 3 étapes fondamentales :

- l'identification des dégradations potentielles de l'équipement ou de la structure étudiée, et de leur localisation précise ; elle permet un classement des problématiques en fonction du type de composant, de la cinétique de dégradation et du coût de remplacement ;
- l'évaluation de l'état du composant ou structure vis à vis de ces dégradations et de ces modes de défaillance potentiels ; elle estime de façon qualitative ou quantitative la durée de vie résiduelle ; c'est également l'étape d'interprétation des données issues de l'inspection, de la maintenance et de la surveillance ;
- la prise de décision généralement basée sur une évaluation du risque, des critères d'acceptabilité et la disponibilité des moyens ; elle engendre les actions correctives (inspection, maintenance, surveillance) nécessaires au maintien de la structure en fonctionnement ou son remplacement.

Ces étapes sont déterminantes pour assurer la connaissance et le maintien à un niveau acceptable des taux de défaillances des équipements et installations. En effet, sans intervention, l'évolution du taux de défaillance d'un équipement en exploitation, de sa mise en service à sa réforme, comprend généralement trois phases principales caractérisées par une loi de fiabilité et des taux de défaillance spécifiques, tels que rappelés dans la figure classique (cf. Figure 9).

En ce qui concerne les équipements critiques, notamment les équipements qui génèrent des défaillances évaluées dans les approches probabilistes des évaluations de risque (par exemple dans les études de dangers), cette évolution n'est pas compatible avec l'hypothèse d'avoir une probabilité de défaillance constante dans le temps.

Les paragraphes suivants présentent brièvement les principaux mécanismes de dégradation ainsi que les problématiques principales du vieillissement. La description détaillée des méthodes utilisées pour la gestion du vieillissement est proposée au paragraphe 6.

2.3.3 Les principaux mécanismes de dégradation

Certains des mécanismes de dégradation les plus courants sont brièvement décrits dans l'annexe 3. Chaque mécanisme spécifique peut dépendre de la nature du processus, de ses causes ou d'une combinaison de plusieurs d'entre eux.

Compte tenu de la nature du processus de dégradation, les mécanismes d'endommagement peuvent par exemple être classés comme suit selon la nature des causes génératives de ces dégradations (Safelife, 2015) :

DOMMAGES MÉCANIQUES

Les dommages mécaniques dans les éléments statiques, dynamiques et rotatifs sont l'une des causes les plus typiques de dégradation. Pour les éléments dynamiques et rotatifs, un processus de vibration sévère peut entraîner des fissures et un relâchement dans la zone d'entrejambe des matériaux. Les effets de ce type de dommages sur les matériaux d'infrastructure sont les suivants : modifications de la forme, de l'alignement axial, des propriétés des matériaux, de la répartition locale des contraintes et des déformations, et/ou de la charge locale et de l'introduction d'autres anomalies ou défauts. Pour les éléments statiques, des charges répétées peuvent conduire à des fissures de fatigue avec des conséquences similaires.

DOMMAGES CHIMIQUES

Comme mentionné ci-dessus dans le cas de la nature du processus de dégradation, les dommages chimiques impliquent l'effet direct des produits chimiques atmosphériques ou biologiques dans la dégradation, et modifient la composition des matériaux en une solution qui a des propriétés chimiques ou mécaniques différentes de celles de la substance d'origine.

DOMMAGES DUS AU SOL

Le mouvement d'une surface, généralement causé par des processus miniers et des tremblements de terre naturels, peut causer d'importants dégâts dans les structures et les bâtiments. Les parties fixes sont plus vulnérables à l'affaissement, car elles sont plus susceptibles de se fissurer dans ces situations. Des matériaux souples et malléables sont utilisés pour éviter les fissures et les craquelures causées par les dommages dus à l'affaissement.

DOMMAGES THERMIQUES

Il existe des dommages thermiques causés par des températures froides et des dommages thermiques causés par des températures chaudes. La capacité thermique des infrastructures varie beaucoup en fonction des matériaux qui les composent, de leur emplacement et de leur rôle spécifique. Dans tous les cas, et à titre préventif, le temps d'exposition thermique doit être réduit au minimum pour éviter un effet de dégradation.

DOMMAGES DUS À L'HUMIDITÉ

Les dommages causés par l'exposition à l'eau sont très fréquents dans les infrastructures et les équipements extérieurs, tels que les ponts, les routes ou les réseaux de télécommunications. Des matériaux adéquats et un système de protection sont nécessaires pour atténuer l'effet de l'humidité et maintenir la structure sèche et propre. La présence d'eau peut provoquer une corrosion humide, un mécanisme électrochimique qui se produit si de l'eau est présente dans l'environnement (ainsi que de l'eau présente sous forme de vapeur dans l'atmosphère).

DÉGÂTS CAUSÉS PAR L'EAU DE MER

Il s'agit d'un cas particulier de dommages dus à l'humidité, car l'eau de mer contient des matériaux corrosifs et abrasifs (principalement des particules de sel et sable) capables d'avoir un effet corrosif important sur les structures. L'abrasion causée par l'impact des particules dures sur la surface de l'infrastructure entraîne une usure de la surface qui se traduit par une perte de matériau (communément appelée effet d'érosion). Le problème est critique en ce qui concerne les équipements marins et les infrastructures proches de la mer. Dans ces cas, des matériaux spéciaux, plus résistants à l'abrasion, sont utilisés (par exemple, la fibre de verre ou le carbone).

DOMMAGES DUS AU GEL

Les dommages dus au gel se produisent lorsque les températures sont suffisamment basses pour produire un impact négatif sur les matériaux qui font partie de la structure. Les parties gelées peuvent provoquer un effet d'éclatement dû à la pression supplémentaire exercée par l'expansion de l'eau, ce qui fissure ou endommage gravement la structure. Les cycles de gel-dégel accélèrent la détérioration des matériaux, provoquant un vieillissement précoce des structures. Les conduites d'eau, par exemple, sont généralement exposées à ce type de mécanisme de dégradation.

DOMMAGES CAUSÉS PAR LES UV

De nombreux matériaux sont attaqués par les rayons ultraviolets (en particulier les polymères) et peuvent se fissurer ou se désintégrer s'ils ne sont pas stables aux UV. La dégradation par les UV est un problème courant dans les produits exposés à la lumière du soleil. Une exposition continue est un problème plus grave qu'une exposition intermittente, car l'attaque dépend de l'étendue et du degré d'exposition.

Les connaissances accumulées sur les différents phénomènes sont importantes. Elles démontrent néanmoins de très forte variabilité dans les cinétiques de dégradation selon les matériaux, l'environnement, les contraintes etc.... De ce fait, la maîtrise des dégradations est souvent spécifique à une activité, une structure ou une situation spécifique. Les compétences et les connaissances sur ces sujets sont donc également relativement spécifiques.

In fine, la connaissance des causes et des mécanismes de dégradation est fondamentale en amont de la conception d'une structure comme durant toute sa durée de vie. Cette connaissance

permet d'établir soit directement des plans de maintenance (composant actifs), soit des plans d'inspection/surveillance de la dégradation et la surveillance de l'environnement, des conditions de process et des installations. C'est le point de départ de la gestion du « vieillissement » qui est très dépendant du retour d'expérience et de la compétence des acteurs.

Pour les éléments mal connus (matériaux innovants, conditions de fabrication spécifiques, conception ou process nouveau etc...), il est parfois difficile d'établir les probables conditions et les cinétiques de dégradations sur la durée de vie de la structure. Ainsi ces composants ou structures peuvent faire l'objet d'approches spécifiques (cf. paragraphe 6.2.6).

2.3.4 Généralités et problématiques du vieillissement dans la gestion des risques

2.3.4.1 Dimensionnement et probabilité de défaillance initiale d'une structure

La gestion du risque de vieillissement d'une structure commence dès le dimensionnement de celle-ci. En effet, lors de la phase de conception, l'ingénieur peut intégrer les dégradations dues au chargement prévu de la structure. Par exemple, on peut dimensionner une structure face à des cycles de charge en fatigue, ou augmenter l'épaisseur d'un équipement pour intégrer une surépaisseur de corrosion pour un équipement qui serait susceptible de se corroder.

In fine, quelle que soit l'approche pour le dimensionnement, la structure est dimensionnée pour une fiabilité structurale cible vis-à-vis de l'usage prévu pour celle-ci. Comme précisé dans (IMdR, 2014), il est important pour l'ingénieur en charge de la gestion de réaliser que la fiabilité structurale évaluée est une valeur « notionnelle » et n'est pas la mesure réelle de la fiabilité vis-à-vis de l'aptitude au service celle-ci étant dépendante de nombreux facteurs de vie de l'équipement.

L'évaluation de la sécurité des structures doit tenir compte des quatre types principaux d'incertitudes :

- **incertitude physique** due aux imprécisions du processus de fabrication, aux variabilités des grandeurs physiques du composant (ainsi qu'aux fluctuations de l'environnement mécanique, climatique, géotechnique, hydraulique, thermohydraulique...) ;
- **incertitude statistique** résultant des modèles statistiques utilisés, en particulier en cas de manque d'information dans les zones d'intérêt ;
- **incertitude de modèle**, traduisant la capacité à représenter physiquement les phénomènes en jeu ;
- **facteur humain et organisationnel**, produisant des déviations, souvent significatives par rapport aux conditions nominales d'évaluation.

Dans l'évaluation de la sécurité des structures, il est important de distinguer les incertitudes dites « normales » de celles d'une déviation en dehors du domaine de fonctionnement possible ou envisageable.

En pratique, le dimensionnement est souvent réalisé sur la base d'un code technique ou d'une norme qui impose de façon implicite ou explicite un objectif de fiabilité de la structure.

Cet objectif peut être une probabilité de défaillance maximale cible (i.e. ISO 2394) ou un ensemble de coefficients de sécurité visant à obtenir une probabilité de défaillance sous-jacente (i.e. Eurocodes).

Dans le cas des structures existantes, le niveau de fiabilité diminue ensuite avec le vieillissement et l'exploitation accumulée. La figure suivante illustre l'évolution de la probabilité de défaillance en fonction de l'âge de la structure. L'incertitude est particulièrement importante au début de la vie de l'équipement, puis lors de la phase de vieillissement.

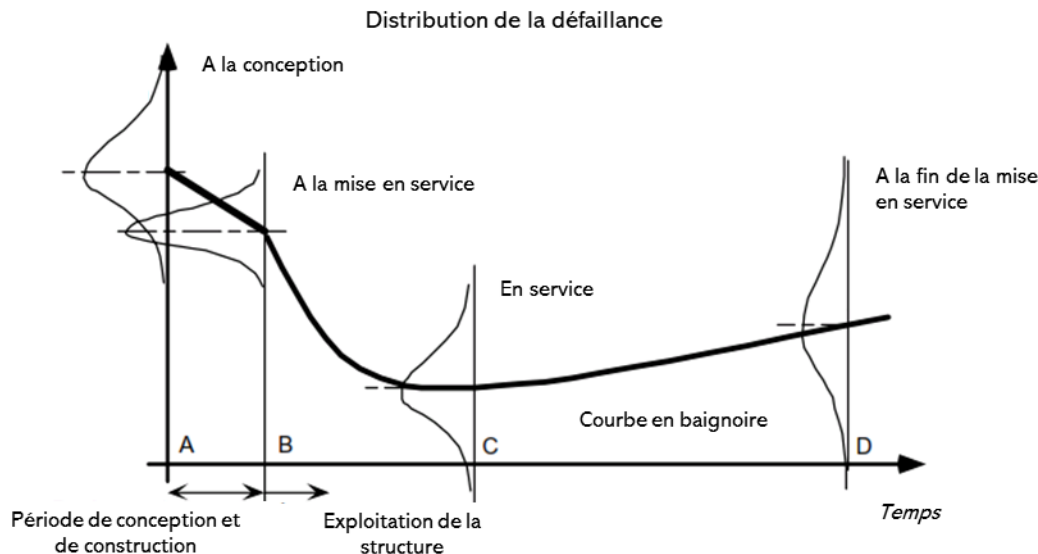


Figure 10 : Évolution de la probabilité de défaillance en fonction de l'âge de la structure (IMdR, 2014)

L'évaluation de la fiabilité des structures existantes vise à prouver que le fonctionnement de la structure satisfait les critères de sécurité pour la durée de vie de service résiduelle. Elle doit être réalisée sur la base des fonctions d'états limites, qui doivent être clairement définies. La fiabilité estimée ne doit pas dépasser des niveaux cibles, qui doivent être différents pour les structures existantes par rapport à ceux de la conception (nouvelles structures).

Les niveaux de fiabilité cible utilisés dans la vérification des structures existantes peuvent être calibrés selon différents objectifs de risque. Ces niveaux de fiabilité exigés sont fonction de l'importance de l'ouvrage et des conséquences socio-économiques dues à la défaillance. Ainsi, la norme ISO 13822 fait par exemple la distinction entre les niveaux de fiabilité exigés lors du dimensionnement (nouvelles structures) et ceux destinés aux structures existantes. Cette distinction tient compte des :

- considérations économiques, où les coûts nécessaires pour le maintien des structures existantes peuvent être très élevés ;
- considérations sociales ;
- considérations environnementales.

Lorsqu'une structure fait l'objet d'une réévaluation, on pourrait donc déterminer sa probabilité de défaillance cible selon ce type d'approche. En pratique, les équipements industriels sont rarement réévalués selon ces codes et le dimensionnement initial (donc la fiabilité cible initiale) sera plutôt considéré comme la marge de dégradation de la structure.

Quelle que soit l'approche, pour être mise à jour, l'évaluation de la fiabilité d'une structure vieillissante nécessite des données d'entrée nouvelles d'état de la structure. C'est le rôle de l'inspection ou des mises à l'épreuve.

Dans le contexte du changement climatique, les équipements peuvent être amenés à subir des agressions supérieures à celles prévues lors de leur dimensionnement. Pour les systèmes à durée de vie longue, comme certaines installations industrielles, des mécanismes de vieillissement peuvent s'enclencher et tendre à augmenter les risques s'il n'y a pas de mesures adaptées (surveillance, maintenance, remplacement) prises par ailleurs. De plus, le vieillissement peut remettre en cause l'indépendance de défaillances, ce qui tend à accroître encore plus le risque.

2.3.4.2 Inspections, mises à l'épreuve et surveillance

Les méthodes d'inspection constituent donc une source d'information essentielle pour estimer la dégradation d'un bien ; les plus importantes sont énumérées ci-dessous :

- Inspection visuelle et inspection visuelle renforcée ;
- Inspection par ultrasons ;
- Inspection radiographique ;

- Inspection électromagnétique ;
- Inspection thermographique.

A titre d'exemple, quelques techniques classiques d'inspection dans l'industrie sont données dans le tableau ci-dessous en fonction des dégradations recherchées (Ineris, 2009) :

Dégradation	Techniques de contrôle / d'inspection
Perte d'épaisseur	Examen visuel
	Ultrasons : ondes longitudinales avec palpeur droit
	Courant de Foucault
	Radiographie-Gammagraphie
	Contrôles dimensionnels
Fissures débouchantes	Examen visuel
	Ultrasons : ondes transversales avec palpeur d'angle
	Magnétoscopie
	Ressuage
	Emission acoustique
	Courant de Foucault
Fissures non débouchantes	Ultrasons : ondes transversales avec palpeur d'angle
	Emission acoustique
Microfissures, Lacunes (cavité de fluage)	Emission acoustique
Modification Métallurgiques	Métallographie répliquée
Modifications dimensionnelles	Examen visuel
	Contrôles dimensionnelle
Cloquage	Examen visuel
	Radiographie
	Ultrasons : ondes longitudinales avec palpeur droit
Corrosion localisée par piqûres	Examen visuel
	Emission acoustique

Tableau 2 : Principales techniques d'inspection selon les dégradations recherchées

D'autres approches peuvent être utilisées, comme notamment les mises à l'épreuve qui ont pour principal rôle de détecter les dégradations générant des défaillances soudaines. Des échantillons de matériaux peuvent également parfois être prélevés et testés en laboratoire.

Dans des cas plus rares ou critiques, des méthodes de surveillance peuvent être mises en place, elles consistent à analyser en direct des mesures pour augmenter la rapidité d'intervention (maintenance, arrêt...) avant la défaillance.

Quoiqu'il en soit, la mise en œuvre de ces différentes techniques de contrôles/essai nécessite des connaissances spécifiques et une bonne maîtrise des modes opératoires, afin d'obtenir des résultats fiables. Le coût généré par ces inspections, essais et maintenance peut être considérable ce qui entraîne des optimisations de la part des industriels dans la mise en œuvre de ces actions d'acquisition de connaissance sur l'état des structures. Dans cet objectif d'optimisation, les problématiques majeures sont notamment la fréquence et l'échantillonnage des mesures, leur localisation et la maîtrise des incertitudes de mesure.

Lorsqu'une dégradation est avérée ou prévisible, la maintenance peut remplacer l'inspection, la surveillance ou les essais.

2.3.4.3 Maintenance

Quatre types de stratégies de maintenance peuvent être identifiées, à savoir la maintenance corrective / réactive, la maintenance préventive, la maintenance prévisionnelle et la maintenance proactive. Dans la pratique, plusieurs stratégies sont souvent utilisées pour la maintenance des systèmes d'ingénierie (IMdR, 2014). L'objectif de l'industriel est souvent d'optimiser l'équilibre entre elles pour une rentabilité / fiabilité maximale.

Pour la plupart des infrastructures/usines, la meilleure stratégie de maintenance combine plusieurs de ces approches, voire toutes. La combinaison appropriée sera influencée par les processus de travail, l'expertise, la technologie, la gestion et la criticité des conséquences de la défaillance.

Maintenance corrective / réactive : « courir à la défaillance »

La maintenance corrective fait référence aux mesures prises uniquement lorsqu'une défaillance du système ou d'un composant s'est produite. Il s'agit donc d'une stratégie rétroactive. Dans ce scénario, la tâche de l'équipe de maintenance consiste généralement à effectuer les réparations le plus rapidement possible. Les coûts associés à la maintenance corrective comprennent les coûts de réparation, les pertes de production et les pertes de ventes. Pour minimiser les effets de la perte de production et accélérer les réparations, des actions telles que l'augmentation de la taille des équipes de maintenance, l'utilisation de systèmes de secours et la mise en œuvre de procédures d'urgence peuvent être envisagées. Malheureusement, ces mesures sont relativement coûteuses et/ou ne sont efficaces qu'à court terme.

La mise en œuvre d'autres types de maintenance réduira le besoin de maintenance corrective, mais, par exemple, les actions d'urgence dues à différents incidents constituent un type de maintenance corrective qui ne peut être évité.

Maintenance préventive systématique : « basée sur le temps ou sur le cycle »

Dans le cadre de la maintenance préventive, l'équipement est réparé et entretenu avant que des défaillances ne surviennent. La fréquence des activités de maintenance est prédéterminée par des calendriers. La maintenance préventive vise à éliminer les tâches d'inspection et de maintenance inutiles, à mettre en œuvre des tâches de maintenance supplémentaires en cas de besoin et à concentrer les efforts sur les éléments les plus critiques. Plus les conséquences d'une défaillance sont importantes, plus le niveau de maintenance préventive doit être élevé. Cela implique en fin de compte un compromis entre le coût de la maintenance préventive et le coût de l'exploitation de l'équipement jusqu'à sa défaillance.

L'inspection joue un rôle crucial dans les stratégies de maintenance préventive. Les composants sont essentiellement inspectés à des intervalles planifiés, afin d'identifier les actions nécessaires avant que les défaillances ne se produisent. La maintenance préventive effectuée à intervalles réguliers permet généralement de réduire les taux de défaillance. Étant donné que la maintenance préventive entraîne des coûts importants en termes de temps d'arrêt programmé – puisque ceux-ci sont plus nombreux que pour les autres stratégies de maintenance, une bonne planification est vitale.

Maintenance conditionnelle prévisionnelle : « basée sur l'état »

La maintenance prévisionnelle fait référence à la maintenance basée sur l'état réel d'un composant. La maintenance n'est pas effectuée selon des calendriers préventifs fixes, mais plutôt lorsqu'un certain changement de caractéristiques est constaté. Cette stratégie repose sur la surveillance et la mesure de l'état des actifs afin de déterminer s'ils vont tomber en panne au cours d'une période future et de prendre ensuite les mesures appropriées pour éviter les conséquences de cette panne.

Une partie des ressources nécessaires à l'exécution de la maintenance prévisionnelle sera disponible grâce à la réduction de la maintenance des pannes et à l'augmentation de l'utilisation résultant d'une planification et d'un ordonnancement proactifs. Une bonne tenue des dossiers est très importante pour identifier les problèmes répétitifs et les domaines problématiques ayant l'impact potentiel le plus élevé.

Maintenance proactive : la « cause première » (root-cause)

La maintenance proactive est principalement axée sur la détermination des causes profondes d'une éventuelle défaillance et sur la résolution de ces problèmes avant qu'ils ne surviennent.

La problématique de la maintenance tout comme l'inspection est une problématique d'optimisation des coûts. La plupart des industries utilise les quatre techniques précédentes de manière intégrée afin d'augmenter la probabilité qu'une machine ou un composant fonctionne de la manière requise tout au long de son cycle de vie avec un minimum de maintenance, c'est la maintenance centrée sur la fiabilité. L'objectif de cette philosophie est d'assurer la fonction déclarée de l'installation, avec la fiabilité et la disponibilité requises, au coût le plus bas.

2.3.4.4 Evaluations des risques

Connaissant le dimensionnement initial d'une structure et les données de dégradation issues de l'inspection, il est nécessaire de mettre en place des méthodes d'évaluation des risques pour les structures vieillissantes. Les méthodes utilisées pour évaluer les risques peuvent être qualitatives, semi-quantitatives ou quantitatives. Le degré de détail requis dépend de l'application particulière, de la disponibilité de données fiables et des besoins de l'organisation en matière de prise de décision.

- L'évaluation qualitative définit les conséquences, la probabilité et le niveau de risque par des niveaux d'importance tels que « élevé », « moyen » et « faible » ; elle peut combiner les conséquences et la probabilité, et évalue le niveau de risque qui en résulte par rapport à des critères qualitatifs.
- Les méthodes semi-quantitatives utilisent des échelles d'évaluation numériques pour les conséquences et la probabilité et les combinent pour produire un niveau de risque à l'aide d'une formule. Les échelles peuvent être linéaires ou logarithmiques, ou avoir une autre relation ; les formules utilisées peuvent également varier.
- L'évaluation quantitative estime des valeurs pratiques pour les conséquences et leurs probabilités, et produit des valeurs du niveau de risque dans des unités spécifiques définies lors de l'élaboration du contexte, une évaluation quantitative complète peut être mise en œuvre.

Le choix de la technique dépend :

- des objectifs de l'étude et des besoins des décideurs ;
- des données et des ressources (humaines et techniques) disponibles ;
- de l'incertitude des données et des informations disponibles et de la sensibilité des différents paramètres ;
- de la complexité de l'application (systèmes complexes dont les risques doivent être évalués sur l'ensemble du système plutôt que de traiter chaque composant séparément et d'ignorer les interactions, les implications potentielles entre les activités ou les systèmes, les dépendances des risques...).

Pour l'évaluation et l'analyse des risques de vieillissement des structures, on retrouve des méthodes classiques d'analyse de risques qui peuvent être utilisées pour plusieurs objectifs :

- on retrouve par exemple les approches basées sur des arbres de défaillances ou des arbres d'événements utilisés pour identifier les scénarios de défaillance impliquant des conséquences critiques ;
- on retrouve également des approches de type AMDEC pour prendre en compte le vieillissement de systèmes comprenant différentes technologies (électrique, mécanique...) ;
- et enfin, on retrouve de nombreuses méthodes visant à optimiser la connaissance et la maîtrise de l'état de l'équipement ou structure au travers de l'inspection, la maintenance et la surveillance des structures comme par exemple les méthodes d'inspection basée sur le risque (Risk Based Inspection - RBI), les méthodes de maintenance centrées sur la fiabilité (Reliability Centered Maintenance - RCM) ou des méthodes de maintien de la fiabilité en service (Fitness for Service (FFS)).

Ces dernières méthodes d'évaluation de risque visent l'optimisation des actions de suivi et de maintien en service tout en assurant un niveau de fiabilité suffisant pour la sécurité d'exploitation. Ces méthodes se rapprochent des analyses réalisées en étude de dangers tout en étant très spécifiques au risque de défaillance par dégradation dans le temps. En effet, on retrouve dans ces méthodes des évaluations de probabilité de défaillance dues aux dégradations, des évaluations de conséquence et des critères d'acceptabilité des risques ainsi évalués. L'objectif de ces méthodes est la priorisation des actions d'inspection, de maintenance et de surveillance pour le maintien en exploitation des structures et

équipements dégradés sans nécessairement introduire les autres risques pris en compte dans les analyses plus générales (dérive de procédé, erreur humaine, environnement etc...).

Les problématiques de mise en œuvre de ces méthodes sont nombreuses et discutées dans le chapitre 6 et concernent principalement la qualité des données nécessaires, la compétence des acteurs et le besoin d'un fort retour d'expérience.

2.4 Problématique de prise en compte du vieillissement dans les études de sécurité et les études de dangers

Du point de vue des études de dangers, on utilise et calcule des valeurs moyennes, qui intègrent des fréquences d'événements pour l'ensemble du cycle de vie d'une installation. Ce qui comprend ses phases de jeunesse et de vieillissement.

Les données les plus fréquemment utilisées, issues de sources de données, représentent différents types d'installation d'âges variables et avec des procédures d'exploitation variables, mais qu'on imagine conformes à un certain état de l'art.

Cette approche permet d'évaluer un niveau de risque moyen sur la durée de vie de l'installation, ce qui peut être suffisant du point de vue du régulateur qui cherche à maîtriser un risque global sur le territoire, mais ne traduit pas le fait que la probabilité serait plus basse en phase de vie utile et plus importante dans la phase de vieillissement. Cela peut poser des problèmes si on considère :

- des nouvelles technologies pour lesquelles la phase de vieillissement est sous-représentée dans le REX ;
- ou bien, un parc d'installations industrielles vieillissantes donc avec des probabilités qui ont évolué.

De ce fait, l'évaluation des risques des études de dangers réalisée intègre le vieillissement des équipements, mais d'une façon qui n'est pas toujours explicitée ou détaillée. La dégradation est, en effet, intégrée de fait par les probabilités d'occurrence :

- des causes / événements initiateurs lorsque la donnée est disponible ;
- ou bien, des événements redoutés centraux qui intègrent l'ensemble des causes.

Dans ce dernier cas, le vieillissement est bien intégré dans l'évaluation, si et seulement si, la quantité de retour d'expérience et la durée d'observation sont suffisantes. En effet, l'utilisation d'une fréquence d'événement englobant l'ensemble des causes nécessite un nombre d'événements représentatifs pour être pertinente. Toutefois, l'approche globale présente certaines limites pour la prise en compte du vieillissement car :

- elle ne permet pas de distinguer l'importance de la cause « vieillissement » dans les défaillances observées ;
- elle représente des équipements avec des durées d'exploitation très variables et mal connues ;
- elle représente également des technologies variables pouvant se dégrader différemment ;
- elle ne permet pas de distinguer les causes de dégradation ;
- elle ne permet pas de distinguer les différentes approches de suivi (absence totale, suivi réglementaire, suivi spécifique...) ;
- elle rend complexe la prise en compte de barrières spécifiques au vieillissement.

Lorsqu'une quantification de probabilité d'événements initiateurs est rendue possible par la disponibilité des données, elle peut être intégrée à l'analyse de risque, notamment au travers d'arbres de défaillances. Cela sous-entend néanmoins que tous les EI sont quantifiables. Dans ce cas des barrières spécifiques ou facteurs de décote peuvent être intégrés à l'analyse comme l'existence d'un plan d'inspection pour l'équipement, un suivi réglementaire ou un suivi par un service d'inspection reconnu (SIR).

Dans une approche simplifiée, du point de vue de la probabilité d'occurrence d'une défaillance, on considère que, pour être compatible avec une étude de dangers, la maîtrise du vieillissement doit veiller

à limiter les taux de défaillances des équipements traités en études de dangers en deçà d'un taux de défaillance cible cohérent avec les hypothèses de probabilité de défaillance.

Une alternative, qui n'est pas exploitée actuellement, consisterait à mettre à jour les estimations de probabilités de défaillance des études de dangers en fonction de l'estimation du taux de défaillance associé au vieillissement.

Autrement dit, dans une étude de dangers les conséquences du vieillissement des installations sur la probabilité ne sont pas prises en compte de manière explicite. L'étude de dangers se contente d'indiquer que les programmes de gestion du vieillissement sont en place (PM2I) et que la mise en œuvre de ce type de programme associé aux plans de test et maintenance permet à l'industriel de s'assurer que les probabilités peuvent être considérées comme « constantes ».

Par ailleurs, lorsque l'on généralise la problématique de la prise en compte du vieillissement aux études de sécurité, il est pertinent de poser la question de la prise en compte des conséquences d'une défaillance liée au vieillissement lors de l'estimation des probabilités d'événements (plausibilité des scénarios, effets dominos, etc...).

Un indicateur de vieillissement pertinent pour être comparé à l'étude de sécurité est donc l'observation de la croissance du taux de défaillance. Deux paramètres sont importants pour caractériser le vieillissement : l'instant d'apparition du vieillissement et sa cinétique une fois qu'il s'est déclaré. La connaissance du premier paramètre (l'instant d'apparition) va permettre d'optimiser la maintenance préventive et celle du second paramètre (la cinétique) va permettre d'évaluer la vitesse de croissance de la probabilité de défaillance, une fois le vieillissement amorcé.

Tenant compte de l'évolution du vieillissement, les composants actifs sont donc maintenus préventivement ou renouvelés périodiquement. Le retour d'expérience sur le matériel permet de confirmer les programmes de maintenance préventive ou au contraire de les adapter périodiquement en fonction des observations recueillies. Les modifications de conception, la modification de maintenance (préventive ou conditionnelle), la rénovation, le remplacement des pièces défaillantes, voire de l'ensemble du matériel, correspondent à des remèdes au vieillissement.

Les tests périodiques ou l'inspection en service ou tout simplement le suivi des paramètres de fiabilité du matériel permettent de mettre en évidence l'amorçage du vieillissement et apportent une aide pour déterminer le moment où il faut appliquer ces remèdes. Dans le cas d'une défaillance catalectique, le test périodique permet seulement de déterminer si le matériel est défaillant et de réaliser une maintenance curative. C'est principalement le retour d'expérience et les défaillances en épreuves (donc la masse d'observation) qui permettent de déterminer des durées de vie utile pour un équipement ou une technologie soumise à ces défaillances soudaines et donc in fine des périodes de maintenance préventive.

L'approche physique du vieillissement concerne surtout les matériels passifs (structures, tuyauteries, récipients sous pression, bacs de stockage...) ou des sous-composants « structuraux » des composants actifs (par exemple le stator d'un moteur). Le processus du vieillissement est associé à un mécanisme de dégradation du matériau constitutif.

Dans cette approche, on veut éviter que la dégradation engendrée entraîne une défaillance et la perte de la mission du matériel : par exemple, le mécanisme de la corrosion provoque une fissure traversante, pouvant amener une fuite importante, ou, plus grave, une rupture brutale du matériel.

Lorsque la dégradation est observée, elle fera l'objet d'un suivi et il suffit alors d'intervenir préventivement (réparation, changement, ...) pour éviter la défaillance.

Afin de déterminer les liens pouvant être étudiés pour mieux prendre en compte la maîtrise du vieillissement dans les analyses de risque probabilistes, il est nécessaire de connaître les grandes lignes des méthodes de quantification des risques, les évaluations dans le cas de taux de défaillance non constants et les produits de sortie de la gestion du vieillissement. C'est l'objet des chapitres 3 à 5 de ce document.

2.5 Processus d'évaluation probabilistes des risques d'un nouveau système

2.5.1 La démarche actuelle : les statistiques fréquentistes

Les statistiques fréquentistes sont une branche des statistiques qui repose sur l'idée que les probabilités peuvent être interprétées à partir de la fréquence d'occurrence d'un événement lors d'un grand nombre d'essais.

La probabilité d'un événement est définie comme la limite de la fréquence relative de cet événement après un très grand nombre d'essais répété dans des conditions identiques ou bien après une durée d'observation longue dans des conditions stables. On définit par exemple la fréquence comme égale à $f_A = \frac{N_A}{E}$, avec f_A la fréquence de l'événement A , N_A le nombre d'observation de l'occurrence de l'événement A et E la durée d'observation totale.

L'utilisation de la loi exponentielle permet de simplifier les calculs. Sous réserve de la mise en œuvre de mesures organisationnelles liées à l'inspection et à la maintenance des installations, on émet l'hypothèse simplificatrice que les mécanismes liés à la détérioration des systèmes sont négligeables sur la période considérée. La loi exponentielle qui modélise un processus sans mémoire revient à considérer un taux de défaillance moyen et constant dans le temps. Elle ne tient alors pas compte du caractère dynamique des mécanismes de détérioration, et considère plutôt la moyenne des causes de dégradation sur toute la durée de vie des systèmes.

Il s'agit aujourd'hui de la méthode utilisée le plus souvent dans les analyses de risques en général et a fortiori dans les études de dangers.

Cette approche présente plusieurs avantages. Il s'agit d'une méthode objective qui ne repose pas sur des croyances ou des hypothèses subjectives comme l'inférence bayésienne ou la pondération par le jugement d'experts. Également, les outils et les méthodes associés, sous réserves d'hypothèses simplificatrices, sont relativement simples à mettre en œuvre, bien établies et les résultats sont faciles à interpréter. Finalement, il s'agit de méthodes largement acceptées grâce à leur structures simples et standardisées.

Pour ces raisons, les statistiques fréquentistes basées sur le retour d'expérience restent une option de choix pour la quantification des probabilités de défaillances. Néanmoins, plusieurs limites et contraintes doivent être mentionnées au regard d'autres méthodes de quantification de la probabilité (Procaccia, 2009).

Premièrement, elle nécessite le recueil d'un nombre d'échantillons d'observation suffisamment grand pour que l'intervalle de confiance soit de faible étendue. C'est-à-dire une durée d'observation très longue ou bien un nombre d'équipements similaires importants.

Deuxièmement, si on veut l'appliquer rigoureusement, elle est d'une grande complexité sur le plan mathématique. On utilise donc des méthodes de calcul simplifiées sous-tendues par plusieurs hypothèses simplificatrices qu'il ne faut pas perdre de vue lors de la quantification de la probabilité de défaillance (par exemple l'utilisation de la loi exponentielle).

Troisièmement, elle suppose le choix d'un modèle statistique représentatif des observations. Cela fait donc intervenir une notion subjective dans l'obtention du résultat.

Quatrièmement, s'agissant de la quantification d'événements rares, les échantillons à l'origine de l'obtention de la probabilité de défaillance peuvent être fortement censurés (le temps d'observation s'arrête avant l'occurrence d'une défaillance), cela peut conduire à obtenir un résultat fortement biaisé.

Cinquièmement, les bornes de l'intervalle de confiance sont souvent mal interprétées. Il ne s'agit pas de bornes fixes, mais ce sont des variables aléatoires (contrairement aux bornes de l'intervalle de crédibilité des statistiques bayésiennes).

Sixièmement, elle occulte souvent l'expertise des systèmes en ne se concentrant que sur l'observation des événements.

Pour pallier ces différentes limites, notamment celles liées au grand nombre de données requise et à la modélisation statique de la détérioration et donc du risque, le présent document liste aux chapitres 3, 4 et 5 d'autres outils et méthodes complémentaires de collecte, de modélisation et de pondération de la fiabilité.

Le présent chapitre vient synthétiser les caractéristiques des différentes méthodes présentées et donner les clés afin d'orienter le choix lors de la sélection des méthodes pour un cas d'application donné.

2.5.2 Processus de fiabilisation d'un système en sûreté de fonctionnement

Dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, lors du développement et de la mise en œuvre d'un nouveau système critique, on distingue 3 phases distinctes lors desquelles différentes démarches et différents outils peuvent être mis en œuvre afin d'évaluer et d'améliorer sa fiabilité :

- **la phase de fiabilité prévisionnelle** : lors de la conception du projet, elle consiste à étudier la fiabilité qualitativement au travers de l'identification des modes de défaillances, de leurs causes et de leurs conséquences et quantitativement grâce à l'utilisation de recueil et de bases de données. Différents outils peuvent être mis en œuvre tels que : les AMDEC, les APR, les arbres de défaillances, la quantification par avis d'experts, les réseaux de Pétri ou les chaînes de Markov ;
- **la phase de fiabilité expérimentale** : ensuite, à partir de prototypes ou d'un nombre limité de composants, des essais sont réalisés pour connaître les marges de conception, pour éliminer les défauts de conception et pour estimer la fiabilité des composants ;
- **la phase fiabilité opérationnelle** : finalement, le retour d'expérience est valorisé pour estimer ou corriger l'estimation de la fiabilité des composants.

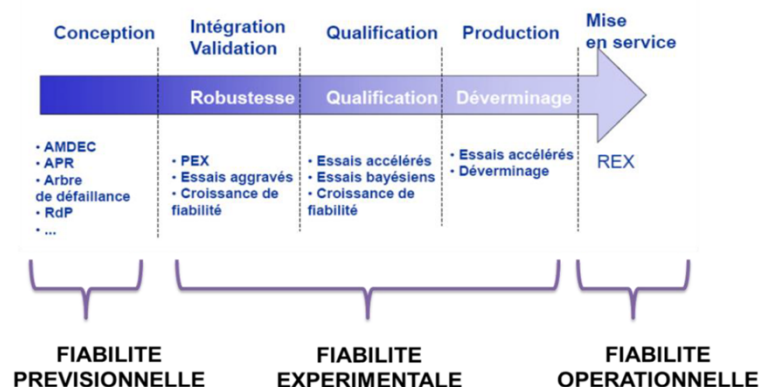


Figure 11 : Outils de sûreté de fonctionnement pour accroître la fiabilité d'un système critique (Tebbi, 2005)

Dans le cadre de ce travail, nous nous positionnons comme l'évaluateur de systèmes nouveaux qui se situent entre les phases de production et de mise en service.

De ce fait, nous considérons les systèmes pour lesquels nous ne disposons pas de données robustes permettant d'estimer la fiabilité des composants, qu'il s'agisse de données issues de recueils de fiabilité existants, ou de retours d'expérience suffisants pour calculer la fiabilité opérationnelle.

2.5.3 Processus d'estimation de la probabilité d'événements en lien avec les technologies émergentes

En réponse à ce besoin de données de probabilité, nous proposons un processus d'estimation reposant sur 3 étapes.

1. Une étape de collecte de données qui fait l'objet du chapitre 3.
2. Une étape de modélisation des probabilités qui fait l'objet du chapitre 4.

3. Une étape de pondération des données qui fait l'objet du chapitre 5.

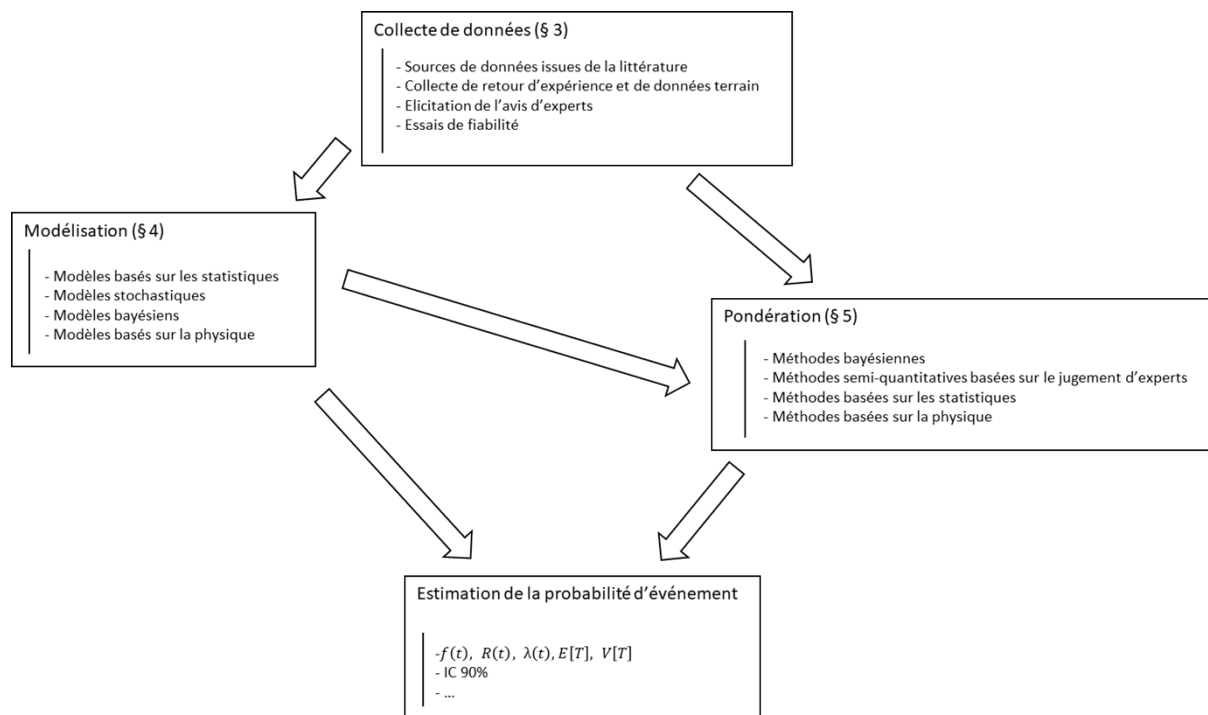


Figure 12 : Processus d'évaluation des probabilités d'événements

Chaque phase est constituée d'une palette d'outils représentant un état de l'art des techniques de quantification probabilistes issues de méthodes d'analyse et d'évaluation de risques ou du domaine de la sûreté de fonctionnement.

Il ne s'agit pas d'une revue exhaustive, mais d'une sélection de méthodes qui, selon l'Ineris, peuvent être mises en œuvre afin d'évaluer les probabilités d'événements en lien avec les technologies émergentes.

Tout d'abord, une étape d'acquisition des données doit être réalisée afin de collecter les données essentielles à la quantification de la probabilité. Quatre méthodes principales de collecte de données ont été identifiées, permettant chacune d'acquérir des connaissances et de disposer de données spécifiques à l'installation et aux systèmes considérés.

1. **La revue de la littérature** consiste à recenser les données disponibles et à identifier les systèmes auxquels elles s'appliquent ainsi que les défaillances qu'elles décrivent.
2. **La collecte de donnée terrain et de retour d'expérience** permet de recueillir les données décrivant les systèmes étudiés et les données décrivant les défaillances telles que le nombre et la nature de défaillances, leurs dates d'occurrence, le suivi de l'état des systèmes et des détériorations, ainsi que le temps d'observation total.
3. **L'élicitation du jugement d'experts** est une méthode qui consiste à interroger un nombre prédéfini d'experts sur un sujet précis à l'aide d'une méthode formalisée. Les experts produisent, consolident et communiquent leurs connaissances qui peuvent être basées sur des raisonnements, des analogies, des extrapolations, etc.
4. **La réalisation d'essais de fiabilité** consiste à soumettre un échantillon de systèmes à une ou plusieurs sollicitations représentatives des conditions d'utilisation afin de produire des données de fiabilité.

Ensuite, si les données ont été recueillies en quantité et en qualité suffisantes, des outils peuvent être mis en œuvre afin de modéliser directement la probabilité. Ces outils peuvent être catégorisés en

différentes familles, selon qu'ils sont basés sur des statistiques, sur des fondements physiques, sur des processus stochastiques ou des modèles bayésiens. Chaque modèle dispose de caractéristiques propres lui conférant des avantages et des inconvénients, ainsi que des contraintes d'utilisation.

Finalement, en complément de l'étape de modélisation, les outils de pondération des probabilités sont utilisés afin d'adapter les données à la configuration étudiée. Ils nécessitent de connaître les spécificités du système à l'origine des données que l'on souhaite pondérer ainsi que les spécificités du système étudié afin de quantifier l'écart entre les deux sous la forme de facteurs d'influence. Ces derniers peuvent être appliqués aux données issues de l'étape de collecte ou bien aux données issues de la modélisation.

Il est à noter que plusieurs des techniques présentées à chaque étape peuvent être combinées, ce qui rend l'exercice de classification particulièrement compliqué. Par exemple, on pourra :

- valoriser les méthodes de collecte de données pour construire les modélisations de la deuxième étape ;
- pondérer les résultats de la phase de modélisation par du jugement d'experts ;
- combiner plusieurs résultats de différentes modélisations statistiques paramétriques basées sur différentes données (littérature, retour d'expérience, avis d'experts, essais de fiabilité) grâce aux statistiques bayésiennes ;
- utiliser les méthodes de pondération statistiques et / ou physiques pour pondérer des résultats de modélisation ;
- ...

Ainsi, parmi l'ensemble des méthodes présentées, à titre d'illustration, on peut choisir de :

- pondérer des données issues de la littérature par des données de retour d'expérience grâce aux statistiques bayésiennes ;
- pondérer des données issues de résultats d'essais de fiabilité par des données de retour d'expérience grâce aux statistiques bayésiennes ;
- pondérer l'avis d'experts par des données de retour d'expérience grâce aux statistiques bayésiennes ;
- pondérer des données issues de la littérature grâce aux modèles semi-quantitatif basés sur le jugement d'experts ou bien par des modèles statistiques et/ou physiques ;
- pondérer des données issues de la littérature à partir de modèles statistiques ou physiques ;
- d'utiliser des données issues de retour d'expérience pour modéliser la défaillance à partir de modèles physiques ;
- ...

En complément à cette méthodologie, et en l'absence de données adéquates ou de REX suffisant, une autre possibilité est de considérer les incertitudes sur les valeurs de fréquences ou de probabilités disponibles et de retenir une valeur majorante dans un premier temps et cela tant que les connaissances sont insuffisantes. Avec l'acquisition de nouvelles connaissances, la probabilité (ou fréquence) pourra être affinée afin de mieux correspondre à la réalité des installations.

Cet axe pour la quantification probabiliste n'a pas été développé dans le cadre de ce rapport et pourra faire l'objet de développements complémentaires, notamment sur les outils d'évaluation et de prise en compte de l'incertitude.

3 Collecte de données

Le principal verrou à la quantification probabiliste dans le cadre des évaluations de risques correspond au manque de données. Il peut s'agir du manque de données descriptives des installations étudiées, du manque de connaissance des mécanismes d'endommagement, mais aussi de la méconnaissance de l'évolution des dégradations ou de l'occurrence des défaillances.

La réponse à ce problème réside donc dans la capacité de l'analyste à recueillir ces informations manquantes et à pouvoir les valoriser afin d'estimer ou calculer les paramètres de fiabilité nécessaires à la quantification probabiliste du risque.

Une variété de processus très différents peut être mis en œuvre pour l'acquisition de ces données. Ces derniers peuvent exiger, entre autres, une longue période d'observation, le déploiement de moyens de surveillance ou la participation d'experts métiers ou en évaluation de risques.

Parmi les moyens de collecte de données, on recense :

- **La collecte de retour d'expérience et l'inspection (données de terrain) (paragraphe 3.1).** Pour une configuration d'installation donnée (type d'équipement, procédé, conditions d'exploitation, de maintenance, environnement...), on collecte : les types de défaillance par équipements, les temps de défaillance pour des défaillances basées sur la durée de vie (catalectique) ou bien le suivi de dégradation (e.g. propagation d'une fissure, diminution de l'épaisseur...) en cas de défaillance basée sur la dégradation progressive.
- **L'avis d'experts (paragraphe 3.2).** Les experts, à partir de leur connaissance de systèmes comparables, de leurs connaissances des méthodes statistiques ou physiques, peuvent faire différentes estimations. Ils peuvent notamment estimer les paramètres de fiabilités d'un système (leur moyenne, leur dispersion, la forme de la loi de répartition...), estimer les paramètres de modèles physiques ou statistiques en général.
- **Les résultats d'essais de fiabilité (paragraphe 3.3).** Un autre moyen de recueillir des données de fiabilité consiste à réaliser des essais de fiabilité. Ces derniers, à partir de la connaissance des mécanismes d'endommagement et des conditions appliquées au système permettent de déterminer les temps de défaillance des systèmes ou bien de suivre un niveau de dégradation.

3.1 Collecte du retour d'expérience et de données terrain

3.1.1 Objectifs de la collecte de retour d'expérience et processus de mise en œuvre

La quantification des probabilités dans le cadre des évaluations de risques se fait habituellement à partir de bases de données fondées sur la valorisation d'un retour d'expérience. En l'absence de données disponibles applicables à l'installation étudiée, il n'est pas possible de quantifier ainsi les probabilités de défaillance. Il peut donc se révéler opportun de mettre en place une démarche de collecte du retour d'expérience de l'installation étudiée ou de sites similaires.

La mise en place d'un processus formalisé de collecte du retour d'expérience permet de s'assurer de la qualité des données collectées et de leur traitement afin d'obtenir des résultats robustes et exploitables. Il couvre l'ensemble des étapes, de la spécification du besoin, à la description des activités de collecte et de traitement. Chaque étape doit être décrite en identifiant les actions réalisées et leurs responsables, les données produites, les moyens utilisés ainsi que les données d'entrée et de sortie.

Il s'agit donc de définir :

- les moyens de collecte et d'enregistrement des données en précisant s'il s'agit de données collectées manuellement (fiches de traitement des défaillances) ou automatiquement ;
- le format des données collectées en respectant un vocabulaire préalablement défini pour en faciliter le traitement ;
- la nature des différentes données collectées ;
- les méthodes de traitement statistiques utilisées ;

- le format du résultats obtenus et éventuellement si ce dernier est associé à une incertitude ou une mesure de la confiance.

Concernant les données collectées, elles sont de plusieurs types et remplissent chacune différents objectifs.

On trouve les données descriptives :

- **du système étudié** : qui couvrent la liste des équipements, leur modèle, la configuration ou la version, la description de leur architecture matérielle en systèmes et sous-systèmes... ;
- **de l'environnement** : qui correspondent aux conditions climatiques, à l'humidité et à la température, à la localisation de l'équipement en intérieur ou en extérieur, à la présence de perturbations électromagnétiques... ;
- **de l'utilisation et du profil de vie** : c'est-à-dire selon l'application, le temps d'utilisation / la distance parcourue / le nombre de cycles, les paramètres d'exploitation (pression, température, taux d'humidité, niveau de vibration, présence de corrosion, intensité ou tension électrique)...

Ces données servent à interpréter la dégradation ou la défaillance et ses conditions d'occurrence. Elles peuvent être utilisées pour retenir ou non l'occurrence d'une défaillance dans le calcul de la probabilité ainsi que pour mettre en place une approche de pondération des résultats si l'on estime qu'il y a un écart entre les installations étudiées et celles sur laquelle la défaillance a été observée.

L'autre type de données est relatif aux dégradations et défaillances, il regroupe :

- l'identification de la nature des dégradations ou des défaillances selon un vocabulaire précis. On distinguera à ce niveau s'il s'agit de défaillances « critiques » ou « non critiques » selon un objectif de sécurité, de disponibilité ou de maintenance ;
- l'état du système à l'instant t et l'évolution de la dégradation, ou bien les dates des défaillances et la durée d'observation totale ;
- le mode de détection et le contexte de la panne, éventuellement ses conséquences sur le système ;
- la recherche de causes profondes et la mise en évidence des mécanismes qui ont conduit à la défaillance qui peuvent être : intrinsèques à l'équipement s'il est lié à un défaut de conception ou de fabrication, à un vieillissement ; dues à l'environnement ; dues à un usage particulier ou à un défaut de maintenance. Des classifications de défaillances sont proposées dans la norme NF ISO 14224 (ISO, 2016).

Au minimum, les informations nécessaires pour calculer la probabilité de défaillance d'un système sont : la durée d'observation totale de ce système et le nombre de défaillances observées. Sans ces dernières, il ne sera pas possible de calculer la probabilité de défaillance.

Selon le niveau de détails, il sera possible de classer les défaillances et d'affiner le résultat en retenant ou en excluant certaines.

Lors de l'étape de collecte et d'enregistrement des données, plusieurs observations doivent être respectées pour favoriser la qualité des données.

Tout d'abord, il convient de s'assurer de la cohérence des données avec l'installation étudiée, de leur vraisemblance, de leur intégrité et de leur complétude. Une étape de vérification des données doit donc être intégrée avant de les enregistrer dans la base de données. On vérifiera également si le format correspond à celui prévu par l'étape de spécification.

Ensuite, une attention doit être portée à la fréquence de collecte. La collecte de données doit être régulière et réalisée à une fréquence suffisamment élevée de sorte que l'intervalle entre 2 collectes doit être cohérent vis-à-vis de la fréquence moyenne des défaillances présumées ou de la cinétique de dégradation. Elle doit aussi tenir compte des fréquences et durées de maintenance des équipements.

Finalement, l'historique doit être conservé et archivé pour être en mesure de justifier les calculs et les résultats obtenus. Cet historique pourra être mis à jour de nouvelles données collectées afin de corriger la probabilité de défaillance. Cela est d'autant plus important pour les probabilités d'occurrence d'événements rares.

Pour aller plus loin, le lecteur pourra se référer à différentes normes génériques ou sectorielles :

- la norme NF C20-312 qui propose une méthodologie et un processus détaillé pour la collecte et l'exploitation du retour d'expérience en sûreté de fonctionnement des systèmes et équipements ;
- la norme IEC 60300-3-2 « Gestion de sûreté de fonctionnement, guide d'application – Recueil de données de sûreté de fonctionnement dans des conditions d'exploitation » qui présente les principes généraux de la collecte de données.
- la norme ISO 14224 qui présente le processus de collecte de retour d'expérience pour le secteur oil & gas.

3.1.2 Evaluation de la qualité du REX et de son adéquation à d'autres configurations

Dans le cas de la valorisation du retour d'expérience quantifié pour estimer des fréquences d'événements d'autres installations ou de scénarios similaires, il convient de vérifier l'adéquation de ce retour d'expérience au nouveau contexte.

A cette fin, il faut, dans un premier temps, décrire les installations étudiées, notamment :

- leur fonctionnement : objectifs, procédés, fluide, pression, température, profil de vie... ;
- leur architecture : nombre et natures des composants qui constituent le système... ;
- les scénarios accidentels envisagés : e.g. perte de confinement et tailles de brèches... ;
- la nature et la fréquence des inspections, tests périodiques et maintenances réalisés.

A partir de cette description, il est possible de comparer ces informations avec les conditions d'obtention du REX quantifié pour juger de l'adéquation des valeurs. Une analyse des écarts doit être réalisée pour évaluer les conséquences sur la quantification. Est-ce que les données sont adaptées, ou bien est-ce que l'on risque de surévaluer ou de sous-évaluer la probabilité de défaillance ? Si nécessaire, des facteurs de pondération peuvent être définis pour corriger la probabilité de défaillance. Si les données collectées sont suffisamment nombreuses et détaillées, il est possible d'identifier des facteurs d'influence au moyen d'outils statistiques.

A ce stade, il est également nécessaire de vérifier la qualité du retour d'expérience, notamment s'il s'agit d'un REX collecté, géré et traité par d'autres. On vérifiera donc sa provenance, la méthode de collecte (déclaration, systématique), la qualité des données (représentativité, exhaustivité, vraisemblance et cohérence).

Le rapport (Ineris, 2015) présente une méthodologie de la qualification de la qualité d'un échantillon de retour d'expérience, le lecteur pourra s'y référer pour davantage d'informations.

3.1.3 Collecte de données par inspection

La connaissance de l'état dégradé ou non d'un équipement est basée sur les données issues de l'inspection. Les incertitudes apportées par l'inspection sont nombreuses et il est nécessaire de prendre en compte a minima :

- les incertitudes communes à la technique employée (intrinsèque à la technologie) ;
- les incertitudes propres à chaque mesure.

De même pour l'obtention des données, l'industrie est souvent confrontée à des soucis d'accessibilité, de grandes surfaces à contrôler et des localisations spécifiques de la dégradation. La qualité des données générées par l'inspection repose alors sur le choix de la méthode, le choix de la localisation des mesures, la quantité de points de mesure et la fiabilité de l'opérateur et de l'outil. Pour rappel, on trouve quelques exemples de méthodes d'inspection de dégradations au paragraphe 2.3.4.2.

Une fois les données collectées, leur traitement reste complexe (mesures nombreuses, résultats variés, incertitudes...) et des méthodes de traitement statistique sont utilisées pour sélectionner et traiter les mesures issues des contrôles. Le krigeage (ou processus gaussien) est par exemple de plus en plus

utilisé dans la représentation des données spatiales (IMdR, 2014), à partir d'un nombre limité de mesures. Cet estimateur linéaire non-biaisé garantit le minimum de variance, et permet l'interpolation spatiale d'un champ aléatoire. Toutefois, ce type d'approche ne peut pas prendre en compte des défauts localisés qui n'ont pas été observés. Pour en savoir plus, les différents traitements statistiques possibles sont notamment évoqués dans (IMdR, 2014).

Quoi qu'il en soit, la compétence et le retour d'expérience sont fondamentaux pour réaliser les « bons » contrôles aux « bonnes » localisations. De nombreux guides existent pour orienter ces choix⁴. L'organisation de l'inspection reste néanmoins fondamentale. L'optimisation de cette inspection peut être régie par différentes méthodes de gestion du vieillissement telles que présentées au chapitre 6.

3.2 Elicitation de l'avis d'experts

3.2.1 Objectifs et caractéristiques du jugement d'experts

L'élicitation d'avis d'experts consiste à former une seule opinion cohérente à partir de l'avis de différents experts dans un domaine de connaissance pour lequel les ressources ou les données sont limitées.

Dans le domaine de l'évaluation des risques, le jugement d'experts peut être utilisé comme réponse au besoin causé par un manque de données objectives. Il peut, en effet, être utilisé pour compléter ou remplacer des données issues d'un retour d'expérience qui pourraient être trop peu nombreuses, de mauvaise qualité ou bien même inexistantes. Dans de nombreux cas, c'est la seule source d'information disponible et pertinente. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit d'une configuration complexe ou nouvelle.

Dans ce contexte, l'élicitation probabiliste consiste à objectiver la représentation et la capitalisation des connaissances des experts sous la forme de distributions de probabilités.

Cependant, comme toute donnée, les jugements d'experts sont une représentation imparfaite et incertaine de la réalité qu'elles cherchent à décrire. Leur qualité repose principalement sur :

- **l'information disponible** et son accessibilité ;
- **la complexité relative du problème** et de **l'état général des connaissances** sur ce problème, et de la manière dont cette complexité est modélisée dans l'esprit de l'expert,
- **les compétences de l'expert** : son éducation, sa culture, sa profession, sa formation théorique et pratique sur le sujet, son expérience, son environnement, sa personnalité, mais aussi sur sa motivation et son sérieux, sa capacité à recueillir, appréhender, transmettre, corriger et agréger ses connaissances ;
- **l'objectivité de l'expert** : sa capacité à rester impartial et à éviter les biais personnels et influence ;
- **la méthodologie de collecte**, c'est-à-dire de la façon dont va s'instaurer le dialogue entre l'expert et l'analyste chargé de recueillir puis d'interpréter son expertise ;
- **la traçabilité et la transparence** : les réflexions, hypothèses, conclusions et incertitudes doivent être tracées et témoignent de la qualité d'une expertise a posteriori.

En pratique, il est rare que plusieurs experts compétents dans le domaine considéré soient disponibles pour exprimer leur avis de manière conjointe. Dans ce cas, lorsque l'on ne dispose que de peu de

⁴ Unifa, Guide des bonnes pratiques pour l'inspection des réservoirs cryogéniques de stockage d'ammoniac, 07/2008

UIC, Guide de surveillance des ouvrages de génie civil et structures, cuvettes de rétention et fondation de réservoirs, DT92, 05/2011

UIC, Guide d'inspection et de maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux, DT94, 10/2011

UIC, Guide d'inspection et de maintenance des réservoirs cryogéniques, DT97, 02/2012

UIC, Guide de surveillance des ouvrages de génie civil et structures, Ponts de tuyauteries, DT 98, 04/2012

UIC, Guide technique professionnel pour l'inspection des tuyauteries en exploitation, DT96, 01/2012

données, il est envisageable de raisonner par similarité. Le jugement d'experts consiste donc à dire si les configurations sont similaires, si on peut avoir confiance dans les données et comment on doit les modifier pour les adapter, si cela est nécessaire.

On propose toutefois, de présenter dans ce chapitre une méthode formalisée d'éllicitation de l'avis d'experts qu'est la méthode de Delphes. Cette méthode peut également être complétée d'entretiens ou de sessions de brainstorming qui sont également des méthodes utilisées pour recueillir l'avis d'experts et cela particulièrement lors des phases d'identification du risque.

Les informations présentées dans le cadre de ce chapitre sont complétées par le chapitre 5 sur la pondération qui présente une méthode de correction des données disponibles basées sur le jugement d'experts.

3.2.2 Un processus de mise en œuvre de l'estimation par le jugement d'experts : la méthode de Delphes

La méthode de Delphes (Villemeur, 1988 ; Signoret, 2021 ; Proccacia, 2009) est une méthode qui organise la consultation d'experts sur un sujet précis afin de recueillir leurs avis et d'en tirer des conclusions sur un problème complexe. Elle repose sur l'idée que les avis d'experts lorsqu'ils sont structurés au sein d'un groupe auront tendance à être de meilleure qualité que leurs avis pris individuellement.

Ces échanges sont organisés pour permettre la rétroaction de l'expression des avis. Elle se compose d'une série d'interrogations répétées. Après l'interrogation de tous les individus, chaque interrogation suivante est accompagnée de la réponse initiale de tous les individus permettant à chacun de reconsidérer sa réponse à la lumière des avis des autres membres du groupe et de converger ainsi vers une réponse plus consensuelle.

Une autre caractéristique principale à la mise en œuvre de la méthode est l'anonymat des experts. En effet, l'anonymisation des réponses est requise pour éliminer les biais de domination des réponses liés à la personnalité, à l'autorité ou à la réputation d'un expert ou d'un groupe d'experts sur les autres.

La mise en œuvre de la méthode fait intervenir des analystes chargés d'organiser le dispositif. Ils sélectionnent les experts, rédigent les versions successives des questionnaires et exploitent les résultats. Les experts qui sont consultés répondent aux questions. Leur nombre n'est pas figé, mais il appartient aux analystes de s'assurer de la légitimité et de la représentativité du groupe.

La méthode est donc composée des étapes suivantes :

1. **Définir précisément et rigoureusement l'objet** sur lequel portera la méthode de Delphes (estimation d'un taux de défaillance, d'une durée de vie, d'une distribution de probabilité...).
2. **Choisir les experts.** Ces derniers devront être indépendants, avoir des connaissances reconnues sur le sujet de l'étude et représentants des différentes sensibilités en fonction de leur activité (par exemple des experts en sûreté de fonctionnement, des utilisateurs du produits ou des concepteurs, des régulateurs...). Bien que leur nombre ne soit pas fixé, il ressort des différents ouvrages consultés que le nombre d'experts peut varier de moins d'une dizaine à plusieurs dizaines. On pourra, lors de cette phase, faire se rencontrer l'ensemble des experts afin de leur présenter les grandes lignes du problème, soulever les difficultés et l'état actuel des connaissances, déterminer les facteurs influents et former les experts aux méthodes probabilistes.
3. **Elaborer un questionnaire.** Les questions doivent être ciblées, précises et si possibles quantifiables. Il faut tâcher d'éviter les multiples interprétations d'une question, notamment liée aux différentes expertises et à la sensibilité des personnes au sujet. L'interrogation, en principe, ne doit pas concerner directement les paramètres de fiabilités qui pourraient être trop abstraits, mais plutôt traiter de grandeurs explicites comme des durées de vie de composants, ou de l'effet de modifications de conception, d'exploitation ou de maintenance sur la durée de vie.
4. **Administrier le questionnaire et traiter les réponses.** Cette phase doit respecter l'anonymat des avis afin d'éliminer plusieurs biais qui pourraient survenir lors de la collecte. Le premier

questionnaire individuel qui sert de base est ensuite enrichi des réponses et des commentaires de chaque expert.

Les étapes 3 et 4 sont répétées jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt pouvant être un nombre de tours fixé, l'atteinte d'un consensus la stabilité des résultats. Quoi qu'il en soit, chaque itération doit tendre à faire réduire les positions contradictoires et donc la dispersion des estimations des experts.

5. **Agréger les réponses et modéliser les résultats.** En fonction du modèle mathématique choisi, on adopte une méthode d'agrégation des résultats. Par exemple, on peut effectuer la moyenne arithmétique des réponses ou la moyenne géométrique. Cette dernière est plus délicate à mettre en œuvre car elle nécessite de définir des pondérations de chaque expert en fonction de la qualité relative de leurs réponses (justesse, précision). La modélisation consiste à définir un modèle statistique représentatif du problème à résoudre. Il pourra être choisi par l'analyste – par exemple : on pourra retenir une loi exponentielle pour les composants qui ne sont pas soumis au vieillissement, une loi de Weibull pour les composants qui le sont, une loi uniforme en l'absence d'information ou simplement un intervalle de confiance, une probabilité ou même un coefficient de pondération. La modélisation de ces résultats pourra servir de données d'entrée à une approche bayésienne ou de pondération des événements.

Plus d'information concernant l'étape 5, relative à la modélisation de l'expertise, seront apportés au chapitre 4.

3.3 Essais de fiabilité

Les essais de fiabilité sont destinés à vérifier ou compléter les données de fiabilité existantes ou à les obtenir lorsqu'elles ne sont pas disponibles, et ceci en procédant à des tests sur un certain nombre d'entités.

Des essais de différents types peuvent être réalisés. Ils peuvent être distingués en fonction :

- **de leur objectif** : Les essais peuvent être mis en œuvre, entre autres pour mesurer un taux de défaillance, ajuster un modèle de loi fiabilité, contrôler une homologation, mettre en place un plan de maintenance, analyser les défaillances et maîtriser les causes de défauts. On distingue les essais qui visent à obtenir un résultat qualitatif des essais qui visent à obtenir un résultat quantitatif. Les essais de démonstration⁵ cherchent à vérifier la tenue minimale des objectifs de fiabilité, tandis que les essais d'estimation permettent de calculer les métriques de fiabilité.
- **des contraintes appliquées** : Elles peuvent être constantes, cycliques, échelonnées, aléatoires (cf. paragraphe 3.3.3.2). On distingue notamment les essais lors desquels on applique un stress correspondant aux conditions normales de fonctionnement du système, des essais aggravés ou essais accélérés qui consistent à appliquer un niveau de stress supérieur (cf. paragraphe 3.3.3).
- **de la procédure ou des résultats attendus** : Lors de la caractérisation de l'essai, il faut définir le critère d'arrêt de l'essai, par exemple on peut choisir d'arrêter l'essai lorsque : tous ou un certain nombre des dispositifs testés sont défaillants ou bien au bout d'une certaine durée de test ou d'un nombre de cycles.

3.3.1 Essais en conditions nominales

Dans un premier temps, les essais se faisaient en conditions normales d'utilisation du système ce qui nécessitait des temps d'essais élevés ainsi que des tailles d'échantillon de test importantes. Dans un objectif de réduction des coûts des essais, des travaux ont été menés d'une part pour réduire la taille des échantillons en tenant compte de connaissances a priori sur les systèmes via les essais bayésiens (cf. paragraphe 3.3.2) et d'autre part pour réduire le temps des essais grâce à des procédés de sévrisation pour accélérer la survenue des défaillances. Ce sont les essais accélérés (cf. paragraphe

⁵ IEC 61124, Essais de fiabilité - plan d'essais de conformité pour un taux de défaillance constant et d'une intensité de défaillance constante, Avril 2023

3.3.3). Ces deux types d'essais sont particulièrement intéressants lorsque l'on cherche à estimer la probabilité de défaillance de systèmes très fiables.

3.3.2 Essais bayésiens

Les essais bayésiens sont basés sur les statistiques bayésiennes plutôt que fréquentistes⁶. Ils consistent à combiner les résultats d'essais avec un modèle de fiabilité a priori pour obtenir un modèle a posteriori par le moyen du théorème de Bayes.

Le modèle a priori est construit à partir des informations connues pouvant être issues du jugement d'experts, d'études préalables ou de résultats de fiabilité (essais ou REX) de systèmes comparables.

Le processus de mise en œuvre des essais bayésiens est détaillé au paragraphe 3.3.6.

Note :

- Plus d'information sur la méthode bayésienne sont disponibles au paragraphe 5.2 qui traite des méthodes bayésiennes.
- Pour plus d'information sur les essais bayésiens, le lecteur pourra consulter la thèse *Planification des essais accélérés : optimisation, robustesse et analyse publiée en 2012 (pour les essais accélérés bayésiens – Estimation bayésienne des SVA (Seyyede, 2012).*

3.3.3 Essais accélérés

3.3.3.1 Principes de base

Les essais accélérés consistent à soumettre un dispositif à un niveau de sollicitation supérieur à celui spécifié, mais qui reste inférieur aux limites opérationnelles ou de destruction du dispositif (cf. paragraphe 3.3.3.3). L'objectif est d'accélérer la vie du produit et de provoquer des défaillances qui seraient survenues au bout d'un temps plus long dans des conditions normales d'opération dans le but d'en tirer des enseignements sur ses caractéristiques de fiabilité.

Cela nécessite de connaître suffisamment bien les mécanismes à l'origine des défaillances (cf. paragraphe 2.3.3) et à l'aide d'une loi d'accélération (cf. paragraphe 3.3.3.4), il est possible de convertir la fiabilité observée lors des essais en la fiabilité attendue en présence de niveaux de stress nominaux.

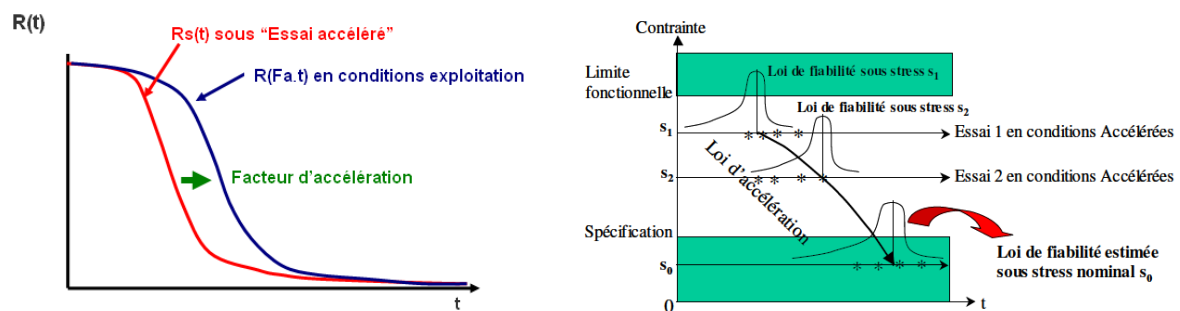


Figure 13 : Schéma de principe des essais accélérés (Tebbi, 2005)

L'élaboration d'un plan d'essais accélérés dépend de plusieurs paramètres qu'il convient de définir (cf. paragraphe 3.3.4).

3.3.3.2 Types de stress

Les stress d'accélération (appelés aussi contraintes ou sollicitations) correspondent à l'ensemble des conditions et facteurs susceptibles d'affecter le bon fonctionnement d'un système et donc qui exercent

⁶ On désigne par *statistiques fréquentistes*, la branche des statistiques qui considère la probabilité comme la limite de la fréquence relative d'un événement après de nombreux essais.

une influence sur la fiabilité. Ils peuvent être de différentes natures (mécanique, électronique, climatique...) selon les modes de défaillances attendus, et dépendre de l'environnement ou du système. Il est à noter que lors de son utilisation un même composant peut être soumis à des stress de différentes natures et qu'il est envisageable que la combinaison de plusieurs stress conduise à une défaillance, par exemple cela peut être le cas du fluage ou de la corrosion sous contrainte. Dans le cadre des essais accélérés, les stress peuvent alors être mis en œuvre de manière différenciée ou combinée.

A titre d'illustration, on liste les stress suivants :

Climatiques	Température, humidité, brouillard salin...
Electrique	Cycle ON-OFF, surtension, intensité de courant...
Mécanique	Torsion, flexion, flexion rotative, chocs mécaniques, vibration, traction / compression, fluage...
Electronique	Décharge électrostatiques, champs magnétiques / électrique, rayonnement...

Ils sont caractérisés par une d'intensité, une durée et un profil d'évolution. On classe les types de chargement en deux catégories que sont : les chargements indépendants du temps et les chargements dépendants du temps. Le choix du profil dépend des conditions d'utilisation du produit ainsi que des limites fonctionnelles (cf. paragraphe 3.3.3.3).

Chargement indépendant du temps :

Chaque groupe de composants, du même nombre, est soumis à un niveau de stress constant. Ce type de chargement est particulièrement utilisé pour des essais accélérés.

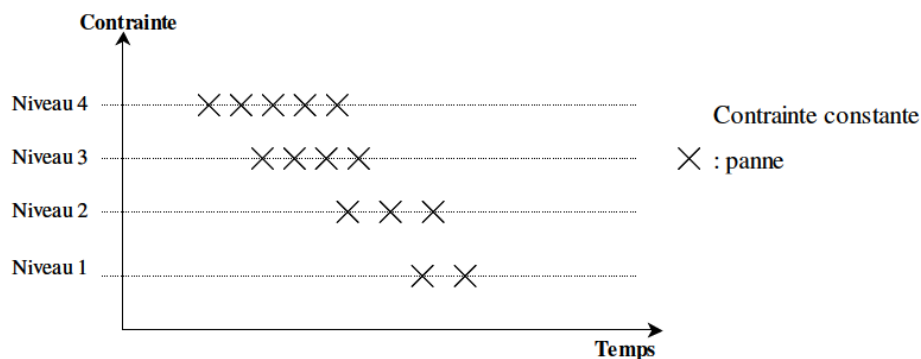


Figure 14 : Schéma de principe d'un plan d'expériences d'essais accélérés à niveaux constants (Tebbi, 2005)

Chargement dépendant du temps :

Dans ce cas, le niveau de stress évolue en fonction du temps. On distingue :

- **les stress échelonnés** : le stress est appliqué par paliers de niveaux croissants ou décroissants dans le temps jusqu'à l'apparition d'une défaillance ;
- **les stress progressifs** : le stress est augmenté ou diminué de manière linéaire dans le temps ;
- **les stress cycliques** : le stress est appliqué selon une amplitude et une fréquence définies ;
- **les stress aléatoires**.

A noter que pour chaque échantillon soumis à l'essai, les conditions de charge doivent être différentes en termes d'intensité de stress.

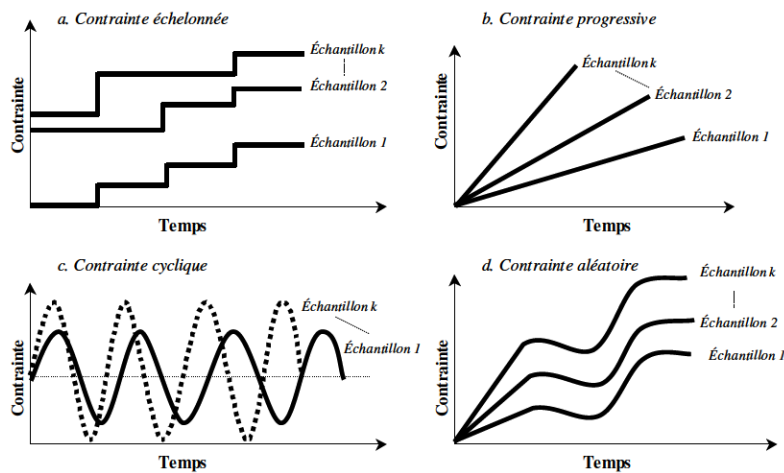


Figure 15 : Schéma de principe d'un plan d'expériences d'essais accélérés à niveaux évolutifs (Tebbi, 2005)

3.3.3.3 Limites fonctionnelles

Pour chaque niveau de stress, sont établies :

- **une plage de spécification** correspondant à la plage d'intensités et de sollicitations prévue par le fabricant et qui doit comprendre les conditions d'utilisation du dispositif ;
- **une limite opérationnelle** ou limite fonctionnelle : c'est la limite au-delà de laquelle le fonctionnement du produit est dégradé (défaillance réversible) ;
- **une limite de destruction** ou **limite technologique** : c'est la limite au-delà de laquelle le produit est défaillant (défaillance irréversible)

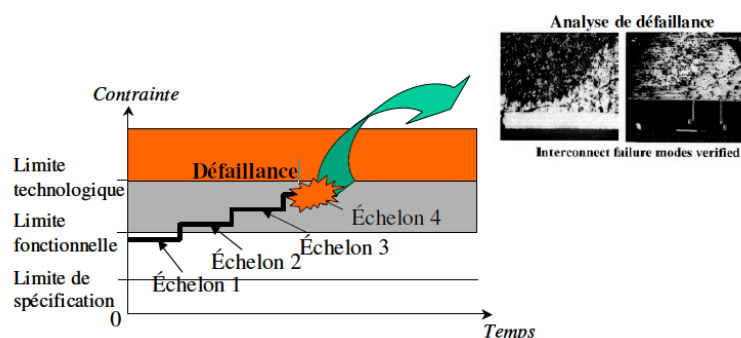


Figure 16 : Représentation schématique des différentes zones de stress d'un dispositif (Tebbi, 2005)

Ces limites permettent de définir les zones suivantes :

- **zone de spécification** : domaine de fonctionnement défini par le fabricant du dispositif ;
- **zone de fonctionnement optimal** : domaine où le fonctionnement est assuré, au-delà on voit apparaître des défaillances ;
- **zone de fonctionnement dégradé** : domaine où le système ne remplit plus sa mission de manière réversible lorsque la contrainte est abaissée ;
- **zone de destruction** : domaine où le système ne remplit plus sa mission de façon irréversible.

Ces zones peuvent être directement données par le fournisseur du système ou bien via des essais à contraintes échelonnées.

3.3.3.4 Modèles de vie accélérée

Afin de convertir le résultat des essais accélérés en loi de fiabilité dans les conditions nominales, il est nécessaire d'utiliser un modèle de vie accélérée. On distingue :

- **les modèles expérimentaux** qui sont déterminés par des plans d'expériences et permettent d'étudier les effets des variables et de leurs interactions combinées sur le système ;
- **les modèles physiques** définis à partir des modèles de dégradation (chimique, physique, mécanique...) ;
- **les modèles statistiques** composés des approches paramétriques, semi-paramétriques et non-paramétriques.

Les modèles statistiques sont privilégiés lorsque les principes physico-chimiques faisant le lien entre les stress appliqués et les temps de défaillance sont difficiles à déterminer. Lorsque les modèles statistiques sont mis en œuvre, chaque échantillon de composants est soumis à différents niveaux de contraintes et les résultats sont utilisés pour ajuster la loi de fiabilité. Pour l'ensemble de l'essai accéléré, un même type de loi est utilisé.

Ces modèles sont donc composés d'une part d'un modèle d'accélération qui traduit la durée de vie accélérée en durée de vie nominale caractérisée par une loi de fiabilité et ses propriétés (moyenne, variance, écart-type...) ; et d'autre part, de la distribution statistique des durées de vie à chaque niveau de stress appliqué.

Un cas particulier des modèles statistiques est le modèle Standard de Vie Accélérée (SVA). Ce dernier utilise une fonction de transfert dans le but de déterminer de quelle façon la fonction de fiabilité (ou autre caractéristique) change lorsque le stress varie. Sans rentrer dans le détail, un modèle SVA se représente graphiquement comme suivant. On remarque que la fiabilité est diminuée par le facteur d'accélération.

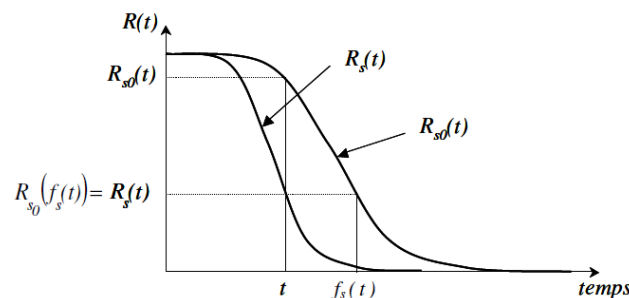


Figure 17 : Représentation graphique d'un modèle Standard de Vie Accélérée (Tebbi, 2005)

On définit ensuite le facteur d'accélération FA entre la durée de vie nominale τ_1 et la durée de vie sous conditions accélérées τ_2 : $FA = \frac{\tau_1}{\tau_2}$

Les lois d'accélération principales sont les suivantes.

Stress	Nom de la loi	Expressions associées	Constantes
Température (T)	Loi d'Arrhénius	$FA = \frac{\tau_1}{\tau_2} = e^{\frac{E_a}{k}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})}$	T_1 et T_2 températures absolue en K dans les conditions normales et accélérées E_a énergie d'activation en eV. k constante de Boltzmann
Pression, vitesse...	Loi puissance inverse	$\tau = \frac{A^\gamma}{V}$	A et γ : constantes expérimentales V stress
Fatigue et température	Coffin-Manson	$N(T) = \frac{A}{T^B}$	T température A, B constantes
Température et autre stress pour les composants électroniques	Eyring généralisé	$\tau = \left(\frac{A}{T}\right) e^{\left(\frac{B}{kT}\right)} e^{(V(c + \frac{D}{kT}))}$	T la température absolue en °K V un stress quelconque k la constante de Boltzmann A, B, C et D des constantes dépendantes de la défaillance et de l'essai.

Stress	Nom de la loi	Expressions associées	Constantes
Température (T) et humidité (H)	Loi de Peck	$FA = \left(\frac{RH_a}{RH_0}\right)^p e^{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$	RH_a le taux d'humidité de l'environnement considéré RH_0 le taux d'humidité de référence ; E_a l'énergie d'activation k la constante de Boltzmann p la puissance accélératrice T_1 et T_2 les températures absolues de référence et de l'environnement considéré en K.
Cycle de fatigue	Loi de Norris-Landzberg	$FA = \left(\frac{24}{N_0} \times \frac{N_{ca}}{t_a}\right) \times \left(\frac{\min(\theta_c, 2)}{\min(\theta_0, 2)}\right)^p \times \left(\frac{\Delta T_c}{\Delta T_0}\right)^m \times e^{\frac{E_a}{k}\left[\frac{1}{T_0 + \Delta T_0} - \frac{1}{T_{mc}}\right]}$	N_{ca} nombre de cycles annuel N_0 nombre de cycle de référence t_a durée annuelle de la phase θ_c durée du cycle en heures θ_0 durée du cycle de référence ΔT_c amplitude thermique du cycle en conditions nominales ΔT_0 amplitude thermique du cycle en conditions accélérées E_a Energie d'activation k constante de Boltzmann T_{mc} température maximale atteinte pendant le cycle T_0 température de référence m coefficient de fatigue p puissance accélératrice
Fatigue en endurance limitée	Loi de Basquin	$N\sigma_a^B = A$	A, B paramètres dépendant du matériaux et des conditions d'essai σ_a contrainte N nombre de cycles

Tableau 3 : Synthèse des principales lois d'accélération

Dans le cas de composants soumis à des modes de dégradations variés et notamment en présence d'événements rares, il est parfois délicat d'estimer la fonction de fiabilité pour chaque mode de défaillance. Dans ce cas, on cherchera plutôt à estimer la fonction de fiabilité globale du composant.

Plus de détails sont disponibles à l'annexe 4.

3.3.3.5 Estimation des paramètres

Après avoir défini le modèle de vie accélérée, il faut en estimer les paramètres. Les techniques d'estimation dépendent de la connaissance du type de distribution de vie et du choix du modèle d'accélération. On peut utiliser des méthodes paramétriques, semi-paramétriques ou non-paramétriques.

L'estimation paramétrique cherche à estimer les paramètres de la distribution de durée de vie spécifiée (i.e. loi de Weibull, loi exponentielle...) à partir de méthodes comme le maximum de vraisemblance. Un modèle est dit paramétrique si l'on connaît à la fois la distribution de probabilité de la durée de vie du produit pour chaque niveau de stress ainsi que l'équation d'accélération.

L'estimation semi-paramétrique s'adresse aux modèles de même forme que pour l'estimation paramétrique en termes de distribution de durée de vie et d'équation d'accélération. En revanche, on cherche à estimer l'influence des stress sans forcément faire d'hypothèse sur la forme de la distribution de la durée de vie. Un des modèles les plus utilisés est le modèle à risque proportionnel ou modèle de Cox qui permet de tenir compte de plusieurs contraintes pour décrire la durée de vie moyenne des produits en plusieurs dimensions (cf. paragraphe 5.5).

Les méthodes d'estimation non-paramétrique sont utilisées lorsque la fonction de survie est inconnue et aucune forme paramétrique de la fonction d'accélération est supposée. Elle suppose une relation fonctionnelle entre la distribution de durée de vie et les niveaux de stress sans émettre d'hypothèse sur la forme de cette distribution.

Davantage d'information est disponible au paragraphe 4 relatif à la modélisation et à l'obtention des paramètres de fiabilités.

3.3.3.6 Conditions à respecter pour la bonne réalisation des essais accélérés

Afin que l'essai accéléré soit réalisé correctement et que les résultats puissent servir à estimer la fiabilité d'un système plusieurs conditions doivent être vérifiées :

- le niveau de stress haut doit être choisi de sorte que :
 - o les mécanismes de dégradation et modes de défaillance provoqués lors de l'essai accéléré doivent être identiques à ceux observés lors de l'utilisation du système en conditions nominales de fonctionnement ;
 - o les contraintes sévèrisées doivent conduire à la même défaillance que celles observées lors du fonctionnement du système ;
 - o la distribution des durées de vie lors de l'essai accéléré doit avoir la même forme que la distribution en conditions nominales de fonctionnement (même loi, mais paramètres d'échelle différents).

A titre d'exemple, des bonnes pratiques concernant les essais accélérés sont :

- pour intégrer la température dans le modèle de vie accélérée, il faut que cette dernière soit inférieure au tiers de la température de fusion du métal afin d'éviter le phénomène de fluage ;
- pour des raisons de validité du modèle, il est indispensable que les ruptures dans les conditions sévèrisées soient obtenues pour des nombres de cycle supérieurs à 1000 cycles.

Également, on veillera à :

- tenir compte des phénomènes d'interactions entre les différents stress, soit lors de l'étape d'analyse dysfonctionnelle des systèmes, lors du choix de loi d'accélération, lors de l'étape de la construction de l'essai accéléré, ou bien lors du traitement statistique. En effet, certains modes de défaillance peuvent être causés par l'occurrence de différents stress qu'ils soient concomitants ou alternés ;
- ce que la population des essais de chaque échantillon soit homogène.

3.3.4 Plan d'expériences

3.3.4.1 Définition et typologies des plans d'expériences

Les plans d'expériences correspondent à l'ensemble des essais réalisés sur un ou plusieurs échantillons dans le but d'acquérir des connaissances sur un système ou un composant. Dans le cadre de ce rapport, il s'agit d'informations sur la fiabilité des systèmes.

Dans une logique de réduction des coûts tout en satisfaisant une incertitude acceptable sur les résultats de la fiabilité du système, ils peuvent chercher à optimiser les différents facteurs d'essais ou contraintes applicables ainsi que leur combinaison pour en déduire une fiabilité avec un risque de se tromper acceptable.

La réduction des coûts se réalise par la réduction du nombre d'essais nécessaires, la réduction de la durée de test ou bien la réduction de la taille des échantillons nécessaires. Parmi les stratégies d'optimisation, il est intéressant de chercher à déterminer les paramètres externes les plus influents ou de faire apparaître d'éventuelles interactions entre les différents stress.

A titre d'exemple, il existe notamment :

- **le plan en étoile** : on fait varier un seul stress toute chose égale par ailleurs ;
- **le plan factoriel** : on fait varier simultanément les valeurs pour chaque stress ;
- **le plan d'expériences en parcelles divisées (split plot)** : en présence d'un stress difficile à faire varier, on traite plusieurs essais en sous-bloc en gardant la valeur de ce stress constante et en faisant varier les autres facteurs ;
- ...

3.3.4.2 Plan d'essais accélérés

Il existe différents types de plans accélérés qui peuvent être retenus dans l'objectif de minimiser l'incertitude d'estimation :

- **le plan d'expériences par régression** : ce plan consiste à déterminer les paramètres de la fonction de transfert uniquement dans des conditions sévères, puis de déduire par régression, la fonction de survie en condition nominales ;
- **le plan d'expériences par endommagement préalable** : ce plan consiste à appliquer dans un premier temps un stress important, avant de revenir au stress nominal et d'emmagasiner ainsi beaucoup d'endommagement pour favoriser l'observation de défaillances.
- **le plan séquentiel** : ce plan consiste à tester un équipement pendant un certain temps. Si l'objectif de fiabilité est démontré, on arrête le test, sinon on continue. Les plans séquentiels peuvent être associés à des stratégies d'évolution de la charge des contraintes.
- ...

3.3.4.3 Optimisation des plans d'expériences

L'optimisation des plans d'expériences peut revenir, de manière non exhaustive et sans que cela soit nécessaire, à :

- **minimiser une fonction coût**, qui va intégrer par exemple : les coûts liés à l'acquisition des produits à tester, des moyens d'essais pour appliquer les contraintes et monitorer les détériorations, à la main d'œuvre, mais aussi les coûts liés à une erreur d'évaluation de la fiabilité qui conduirait à une politique de maintenance trop restrictive ou bien un risque d'accident ;
- **satisfaire la contrainte du niveau de risque minimum** ou minimiser le risque de sur- ou sous-évaluer la métrique de fiabilité ;
- **satisfaire une contrainte d'incertitude** sur les métriques de fiabilités obtenues par les essais ;
- **satisfaire des contraintes opérationnelles** ou liées à des choix sur les essais, par exemple en termes de : taille d'échantillon, de nombre et d'intensité de niveaux de stress, de durée d'essais...

Souvent, cette optimisation n'est pas résoluble analytiquement et doit faire l'objet d'algorithmes d'optimisation dédiés comme : la surface de réponse, le recuit simulé, le gradient stochastique, ou les algorithmes génétiques.

En ce qui concerne les plans d'essais accélérés, la construction de plans doit trouver un équilibre entre efficacité et précision d'extrapolation. Un nombre élevé de défaillances améliore l'efficacité de l'estimation, mais nécessite en contrepartie des niveaux de stress élevés qui imposent une extrapolation significative pour revenir aux conditions nominales. Également, les plans d'essai avec plusieurs niveaux de stress, plus difficiles à mettre en œuvre, sont plus robustes que ceux avec peu de niveaux, car ils permettent de vérifier la validité du modèle de vie accélérée.

Concernant les plans optimaux, plus d'informations peuvent être trouvées dans la thèse : *Planification des essais accélérés : optimisation, robustesse et analyse* (Seyyedeh, 2012).

3.3.5 Choix de l'essai de fiabilité

Il ressort, de l'ensemble des paragraphes précédents, plusieurs types d'essais de fiabilité que l'on peut envisager pour répondre à la question de l'évaluation de la fiabilité d'un système. Ce choix est motivé par les objectifs à atteindre, mais aussi les contraintes en termes d'informations disponibles, de coûts, de temps, et de moyens que l'on peut mettre en œuvre.

En définitive, il est possible de combiner les caractéristiques suivantes :

- **essais de dégradation ou de durée de vie** : selon qu'on puisse mesurer ou non l'évolution d'une détérioration des composants au fur et à mesure de l'essai ;

- **essais de démonstration ou essais d'estimation de la fiabilité** : selon que l'on cherche à démontrer qu'un système réponde à des exigences de fiabilité ou alors à estimer ses paramètres de fiabilité ;
- **en considérant que le taux de défaillance est constant ou non** : selon que l'on pose l'hypothèse que le système ne soit pas soumis aux mécanismes de vieillissement et d'usure ce qui a pour conséquence de simplifier les calculs, ou non ;
- **approche fréquentiste ou approche bayésienne** : selon que l'on dispose d'informations a priori fiables ou non ;
- **essai sévéré / accéléré ou en condition nominales de fonctionnement** : à condition d'avoir pu identifier des facteurs influant l'occurrence de la défaillance, de disposer des outils de traitement des données (modèles physiques, statistiques ou expérimentaux), et des moyens de sévérisation des conditions ;
- **différentes évolutions de la charge des stress appliqués** : lors de la réalisation d'un essai accéléré, comme détaillé précédemment, il est envisageable de faire évoluer ou non la charge des stress ;
- **conditions d'arrêt et de censures** : si tous les produits sont défaillants : il s'agit d'un essai complet non censuré ; Si l'on pose comme critère d'arrêt de l'essai un nombre prédéfini de défaillances (auquel cas le temps est une variable aléatoire) il s'agit d'une censure de type II ; Si l'on pose comme critère d'arrêt un temps défini (auquel cas le nombre de défaillances est une variable aléatoire), il s'agit d'une censure de type I ; Si l'essai est arrêté en fonction des résultats cumulés de l'essai sans critère préalable : il s'agit d'un essai progressif ou séquentiel ;
- **différents types de plan d'expériences** : finalement, plusieurs types de plans d'expériences sont possibles selon que l'on souhaite optimiser le nombre d'essais à réaliser, la taille des échantillons ou la durée des essais en fonction des contraintes à appliquer et leurs interactions éventuelles.

3.3.6 Processus d'une démarche de plan d'essais

Les étapes de la mise en œuvre d'une démarche de plan d'essais de fiabilité sont les suivantes.

1. **Analyse fonctionnelle du système à étudier**, description du fonctionnement. L'objectif est de décrire le comportement du système.
2. **Description des conditions d'utilisation (environnement et procédé)**. Ces informations permettront de concevoir les bancs d'essais et de les régler. Dans la mesure des connaissances disponibles, il s'agit à cette étape d'identifier les différents paramètres de fonctionnement qui pourraient avoir un lien sur la fiabilité et leurs interactions possibles.
3. **Analyse dysfonctionnelle du système** : mécanismes de détérioration / dégradation, causes et modes de défaillance ainsi que leur répartition. Elle cherche à se questionner sur l'occurrence des différents modes de défaillances et leurs causes potentielles. Les mécanismes de dégradation et les contraintes qui ressortent de cette analyse seront ceux qui pourront être appliqués au système étudié lors des essais de fiabilité.
4. **Analyse du retour d'expérience** sur des systèmes identiques ou proches, consolider la connaissance autour de ses systèmes. Cette étape d'analyse des défaillances antérieures sur des systèmes similaires, permet lorsque c'est possible, d'identifier en pratique les modes de défaillances et de souligner leurs répartitions pour mettre en valeur les plus probables.
5. **Définition du plan d'essais** : type d'essais (durée de vie ou dégradation, estimation ou démonstration, approche fréquentiste ou bayésienne, avec ou sans accélération...) taille de l'échantillon, durée de l'essai, conditions d'arrêt...

Etapas spécifiques aux essais accélérés	Etapas spécifiques aux essais bayésiens
5.1 Identifier le phénomène ou les phénomènes physiques de dégradation (les mécanismes de défaillances provoqués doivent être représentatifs des conditions normales d'emploi). 5.2 Choisir les contraintes à appliquer et de leurs niveaux (les niveaux de contraintes doivent rester inférieurs aux valeurs limites technologiques). 5.3 Déterminer ou construire le modèle analytique reliant la vitesse de dégradation à l'amplitude des sollicitations appliquées (la loi d'accélération). 5.4 Réaliser les essais de fiabilité 5.5 Déterminer la valeur des paramètres intervenant dans ces modèles (estimation des modèles et de leurs paramètres) et donc le facteur d'accélération. 5.6 Analyser les résultats via un traitement statistique, ici dans le but d'obtenir un taux de défaillance, une loi de probabilité ou bien la probabilité annuelle de défaillance du dispositif.	5.1 Rassembler les données a priori disponibles sur le système à étudier. 5.2 A partir de ces informations, construire un modèle a priori. 5.3 Réaliser des essais sur le système étudié dont les résultats constituent la vraisemblance. 5.4 Combiner la loi a priori avec la fonction de vraisemblance au moyen du théorème de Bayes.

Tableau 4 : Etapes des processus de mise en œuvre d'essais accélérés (gauche) et bayésiens (droite)

Les étapes 1 à 4 permettent d'appréhender le fonctionnement du système et de déterminer :

- les composants qui pourraient être plus à l'origine des défaillances du système, notamment s'il y a des composants qui sont plus susceptibles de défaillir que d'autres ;
- les causes de défaillances prépondérantes et les éventuels stress ou contraintes correspondants.

Cela dans le but de définir un plan d'essais adapté et optimisé afin de définir au mieux la fiabilité du système étudié.

3.4 Caractéristiques des méthodes de collecte de données

Méthodes	Avantages	Limites et contraintes	Quand l'utiliser	Quand l'éviter
Données issues de la littérature	Les données sont facilement accessibles et mises en forme pour être prêtes à l'emploi dans les évaluations de risques.	Les bases de données ne détaillent pas toujours les méthodes de collecte et le traitement statistiques des données. Elles ne définissent pas toujours précisément le périmètre couvert par les données (prise en compte de barrières, regroupement de plusieurs sous-systèmes...). Elles sont issues de la collecte de retour d'expérience datant de plusieurs décennies et peuvent ne pas couvrir les nouvelles technologies ou ne pas correspondre aux standards actuels de conception, exploitation et maintenance.	Lorsque les installations étudiées correspondent aux installations couvertes par la base de données. Elles peuvent servir de base à une démarche de pondération des données.	Lorsque les installations étudiées ne correspondent pas aux installations couvertes par la base de données.
Données de retour d'expérience	Les données correspondent tout à fait à la configuration étudiée et couvrent l'ensemble des causes et modes de défaillances de l'installation au-delà de ce qui a été identifié lors d'une démarche d'identifications a priori. Le mode de collecte peut être adapté pour apporter plus ou moins d'information : selon l'utilisation prévue des données on pourra recueillir l'évolution de l'état du système pour modéliser la dégradation ou simplement les dates et nature des défaillances.	La collecte de retour d'expérience nécessite de déployer des moyens de collecte voir de surveillance des systèmes pendant un temps long. La collecte de retour d'expérience, ne permet pas d'estimer la fiabilité d'un système avant sa mise en service. Ces dispositifs peuvent se révéler coûteux et ne permettent pas d'obtenir des données rapidement.	La collecte de retour d'expérience doit être mise en œuvre systématiquement afin de corriger ou compléter des estimations a priori. Elle pourra être qualitative ou quantitative. La nature et la quantité de données disponibles détermineront les méthodes de modélisation ou de pondération à utiliser.	/
Elicitation de l'avis d'experts	Le principal avantage de ce moyen de collecte réside dans sa capacité à produire des données sans nécessiter la moindre mise en œuvre de systèmes physiques expérimentaux ou de surveillance des systèmes. L'obtention des estimations de fiabilité se fait également dans un temps relativement court. L'élicitation de l'avis d'expert peut être utilisée comme réponse à des besoins de quantification pour des cas d'application variés.	Cette méthode reste une méthode subjective où les analystes et les experts sont soumis à différents biais lors des étapes de choix des experts par les analystes, des choix des différentes formalités du processus (règles d'arrêt de la méthode, règles d'agrégation des avis...) et lors des échanges entre experts et analystes. Contrairement aux données basées sur des fondements empiriques ou scientifiques, il est difficile de valider ou de vérifier une probabilité subjective. Cela peut poser des problèmes de confiance dans les analyses et les décisions basées sur ces probabilités. Deux experts peuvent avoir des opinions divergentes sur un même sujet ce qui peut compliquer la prise de décision et le processus d'agrégation des données. Les analystes devront s'assurer de la reproductibilité des résultats. C'est-à-dire que les étapes intermédiaires d'agrégation des réponses, le processus itératif et les échanges entre experts et analystes devront être menées de sorte à en limiter la variabilité. Les experts doivent être compétents dans le domaine considéré, mais aussi être en mesure de transmettre, corriger et agréger leurs connaissances. Les analystes doivent s'assurer que les experts restent impartiaux. La formalisation de la méthode de collecte mise en place pour assurer la répétabilité et éviter l'introduction de biais peut se révéler difficile à mettre en œuvre. Il est notamment nécessaire de trouver un nombre suffisant d'experts disponibles dans le domaine.	En cas de manque de données adaptées à la configuration étudiée. Il est préférable, mais non obligatoire, d'avoir une première indication objective de la fiabilité des systèmes considérés.	Lorsqu'il est difficile pour les experts de raisonner par analogie ou pas extrapolation, notamment s'il s'agit d'une technologie avec aucun système existant comparables.
Essais de fiabilité	Les essais de fiabilité permettent d'obtenir des données de fiabilités objectives en l'absence de retour d'expérience et sur un temps plus court. Ils présentent l'avantage de donner un résultat précis et justifié pour des modes de dégradation identifiés. Les essais accélérés et les essais bayésiens peuvent être utilisés pour réduire la durée de l'essai ou la taille de l'échantillon nécessaire	Pour mettre en œuvre les essais de fiabilité, une bonne connaissance des causes de défaillance, des mécanismes de dégradation, mais aussi des seuils opérationnels et de destruction en fonction de l'intensité de la charge sont nécessaires. Les conditions de dégradation ne seront jamais tout à fait les mêmes qu'en fonctionnement. Les résultats obtenus sont donc une estimation de la réalité. Tout d'abord, parce que les conditions exactes d'un stress ne peuvent pas être reproduites et du fait de la limite des modèles. Ensuite, il est compliqué d'identifier et de modéliser les dépendances de plusieurs contraintes simultanées ou alternées à l'origine de la défaillance. Cela peut avoir pour conséquence de définir des plans d'expériences compliqués, coûteux et dont l'optimisation doit être réalisée à l'aide d'outils numériques.	Les essais de fiabilité sont une option de choix lorsque l'on ne dispose d'aucune donnée objective sur la fiabilité des systèmes. Ils peuvent être utilisés pour compléter une analyse préliminaire basés sur le jugement d'experts ou bien servir d'a priori à la quantification avant	Il n'est pas recommandé de réaliser des essais de fiabilité lorsque l'on a une mauvaise connaissance des mécanismes de dégradation. Il n'est pas recommandé de réaliser des essais

Méthodes	Avantages	Limites et contraintes	Quand l'utiliser	Quand l'éviter
	pour estimer la fiabilité d'un équipement avec un niveau de confiance suffisant.	Également, certaines causes de défaillance ne sont pas testées avec les essais de fiabilité (e.g. erreurs opérateurs), les données de fiabilité obtenues doivent donc être complétée d'autre méthodes (e.g. statistiques ou basées sur le jugement d'experts) pour obtenir des données de fiabilité complètes.	d'être complétés par un retour d'expérience.	accélérés lorsque que l'on ne connaît pas les limites fonctionnelles de chaque stress ou que l'on ne dispose pas de modèle permettant de représenter le facteur d'accélération. Il n'est pas recommandé de réaliser des essais bayésiens lorsque l'on a une mauvaise confiance dans les connaissances a priori.

Tableau 5 : Caractéristiques des méthodes de collecte de données

4 Modélisation de la probabilité d'événements

Ce chapitre présente les principaux outils de modélisation de la probabilité d'événements pouvant être mis en œuvre dans le cas d'études de sécurité. Pour chacun sont détaillés, les principes généraux et les principes de fonctionnement.

4.1 Familles de modèles

Une fois les données collectées, il s'agit de les valoriser pour à terme estimer la probabilité d'occurrence d'événements. A cette fin, plusieurs modèles et techniques peuvent être mis en œuvre afin de décrire les probabilités d'événements en lien avec un système.

Nous proposons de retenir les grandes familles de modèles suivantes :

- les approches basées sur les modèles statistiques ;
- les approches basées sur les modèles stochastiques ;
- les approches basées sur les modèles bayésiens ;
- les approches basées sur les modèles physiques ;
- autres méthodes non présentées dans le cadre de ce document.

4.1.1 Les approches basées sur les modèles statistiques

L'approche statistique est basée sur les données historiques. Elle suppose que ces données peuvent être décrites par un modèle mathématique qui ne cherche pas à simuler la réalité des phénomènes, mais qui cherche à décrire de façon globale les relations entre les causes de dégradation / défaillance et les paramètres du système et de son environnement. Le modèle statistique est utilisé pour représenter l'évolution temporelle et les variabilités des modèles de comportement et leurs paramètres.

Les modèles statistiques peuvent être déterministes lorsqu'ils sont utilisés pour prédire une valeur spécifique sans tenir compte de l'incertitude ou bien probabilistes. Les méthodes classiques telles que la régression linéaire et la régression logistique sont des exemples de modèles statistiques.

4.1.2 Les approches basées sur les modèles stochastiques

Les modèles stochastiques sont probabilistes par essence. Ils considèrent que le système est soumis à des processus aléatoires, par conséquent les résultats du modèle sont également aléatoires. Les modèles stochastiques sont souvent utilisés pour modéliser des phénomènes dynamiques et évolutifs où l'incertitude est inhérente. A la différence des modèles statistiques qui abordent l'incertitude au travers de la distribution de probabilité et de l'utilisation d'intervalles, les modèles stochastiques gèrent les incertitudes à l'aide des processus. On distingue :

- les modèles de fiabilité qui considèrent le temps d'occurrence de la défaillance (i.e. la durée de vie) d'un système comme une variable aléatoire et cherchent à déterminer sa fonction de densité de probabilité ;
- les modèles de détérioration qui considère la durée de vie restant comme une variable aléatoire et cherchent à en déterminer sa fonction de densité de probabilité.

4.1.3 Les approches basées sur les modèles bayésiens

Les approches basées sur les réseaux bayésiens décrivent l'état initial d'un système à l'aide d'une fonction de fiabilité conditionnelle, puis utilisent le principe du théorème de Bayes pour mettre à jour les estimations probabilistes.

Une fois qu'une fonction de fiabilité conditionnelle est déterminée, la fonction de durée de vie utile restante est définie comme le temps conditionnel prévu jusqu'à la défaillance ($T - t$), compte tenu de l'état actuel (x_t), qui peut ou non dépendre du temps. Les variantes de modélisation diffèrent non seulement par la manière dont elles calculent la fonction de fiabilité conditionnelle, mais également par

les informations utilisées pour définir l'état actuel ($Z(t)$). On distingue : les réseaux bayésiens statiques qui ne représentent pas l'évolution des variables aléatoires des réseaux bayésiens dynamiques qui représentent l'évolution des variables aléatoires.

4.1.4 Les approches basées sur les modèles physiques

Les modèles physiques de dégradation se basent sur la compréhension des phénomènes de détérioration mécanique, physique ou chimique des matériaux et des systèmes. A l'aide de lois de comportements des systèmes sous l'effet de contraintes fonctionnelles ou de contraintes liées à l'environnement, ils décrivent la cinétique d'évolution de la détérioration. Ils font donc appel à des paramètres propres à chaque matériau et à chaque configuration.

On distingue les modèles physiques qui fournissent des résultats déterministes des modèles physiques probabilistes.

4.1.5 Les autres approches de modélisation de la probabilité

À la liste des types de modèles présentés précédemment, il faut rajouter les systèmes basés sur la connaissance tels que les systèmes experts à règles fixes ou à logique floue, ainsi que les approches faisant intervenir des techniques d'apprentissages automatiques. Ces méthodes ne sont pas développées dans le présent document, car il est estimé qu'actuellement, elles ne font pas parties des méthodes les plus souvent mises en pratique.

4.2 Caractéristiques des modèles

Chaque modèle est défini par des caractéristiques qu'il est pertinent de relever afin d'explicitier leur fonctionnement, leur objectifs et leurs contraintes. Les caractéristiques suivantes sont présentées :

- le modèle peut-être probabiliste ou déterministe ;
- le modèle peut être basé sur la physique, sur les statistiques ou être hybride entre les deux ;
- le modèle peut être non-paramétrique, semi-paramétrique ou paramétrique ;
- le modèle peut modéliser une durée de vie ou une détérioration.

4.2.1 Modèle probabiliste ou déterministe

Les modèles déterministes ne tiennent pas compte de la variabilité des paramètres d'entrée, ni de l'incertitude des résultats. Ils prédisent une valeur ou bien une trajectoire unique.

Il est à noter que dans le cadre des évaluations de risques probabilistes, les résultats des modèles déterministes doivent être probabilisés. Pour les données issues d'observations, de jugements d'experts ou de résultats d'essais, des modèles probabilistes permettant de caractériser la dispersion des paramètres du système peuvent être ajustés sur les données recueillies au moyen d'estimations statistiques et de tests d'adéquation. Concernant les modèles physiques, cela peut être fait en probabilisant directement les résultats à l'aide d'une fonction de densité de probabilité, ou bien en considérant que les paramètres des modèles déterministes sont des variables aléatoires.

4.2.2 Modèle basé sur des données « physiques » ou « statistiques »

Il est également pertinent de considérer sur quels types de données, les modèles sont fondés.

Les modèles statistiques utilisent des données issues d'observations du retour d'expérience comme un nombre de défaillance ou les dates des défaillances ramenées à un temps d'observation.

Les modèles physiques, quant à eux, ont pour données d'entrée les caractéristiques du système étudié associées à l'évolution des conditions d'exploitation et de son environnement.

Certains modèles sont à la frontière entre ceux deux approches. C'est le cas des méthodes résistance-contrainte, qui comparent la distribution de probabilité de la résistance d'un matériau ou d'un composant avec la distribution de probabilité des sollicitations, et également des méthodes statistiques ARMA (cf.

paragraphe 4.3.3), des processus stochastiques ou des réseaux bayésiens qui sont utilisés pour modéliser l'évolution de la détérioration d'un matériau ou d'un composant.

En général, la conséquence principale réside dans le fait que les modèles statistiques basés sur la physique nécessitent une compréhension avancée des mécanismes de détérioration à l'origine des défaillances, tandis que les modèles statistiques basés uniquement sur des observations modélisent la probabilité dans une approche plus globale ne nécessitant pas d'interprétation directe des données.

4.2.3 Modèle paramétrique, semi-paramétrique ou non paramétrique

Les modèles sont définis comme étant paramétriques, semi-paramétriques ou non paramétriques selon que les modèles sont expliqués totalement, partiellement ou pas du tout par un nombre fixe de paramètres caractérisant la distribution. Les modèles semi-paramétriques ou non paramétriques sont plus flexibles et ne nécessitent pas de faire d'hypothèses sur la distribution. En revanche, les modèles paramétriques, s'ils sont correctement déterminés permettent d'évaluer efficacement la grandeur de probabilité recherchée.

4.2.4 Modèle de durée de vie ou modèle de détérioration

Une autre distinction concerne les modèles de durée de vie et les modèles de détérioration.

Les premiers considèrent que le temps d'occurrence entre un état initial et la défaillance, appelé durée de vie du système, est une variable aléatoire. La fiabilité est alors obtenue à partir de la détermination de la densité de probabilité de la durée de vie.

Lorsque la fiabilité d'un système peut être affectée par des incidents aléatoires intervenant lors de l'exploitation, il est pertinent de se tourner vers des outils de modélisation de la détérioration. Des exemples souvent cités dans la littérature correspondent à la modélisation de la propagation de fissures, la modélisation de la corrosion ou bien de l'usure d'un système ou un matériau.

Une conséquence à laquelle, le lecteur devra porter son attention correspond à ce qui est modélisé. Certains modèles de détérioration ne permettent que de modéliser une ou plusieurs détériorations que subit le système, tandis qu'un modèle de durée de vie permettra généralement de modéliser la fiabilité d'un système dans sa globalité, tenant compte de causes de défaillances plus nombreuses. Ce dernier sera donc généralement moins précis, mais plus complet.

Afin de modéliser la fiabilité à partir d'un modèle de détérioration, il est nécessaire de connaître :

- l'état actuel du système étudié ;
- la cinétique de dégradation ;
- l'évolution future de l'environnement d'exploitation.

Toutes les dates sont référencées par rapport à une origine connue. On parle alors d'âge du dispositif.

On distingue les modèles de détérioration par cumul de dommages des modèles de détérioration par perte de résistance

Les modèles par perte de résistance correspondent à la diminution de la résistance en fonction de l'âge du système. Cette diminution est liée à l'évolution passée et future du chargement des différentes sollicitations causées par l'environnement ou le fonctionnement du système. C'est, par exemple, le cas d'une perte d'épaisseur par corrosion au cours du temps.

Dans ce cas, le modèle peut être exprimé comme un coefficient multiplicatif prenant la forme d'un coefficient, d'une fonction déterministe ou aléatoire venant dégrader la valeur d'une fiabilité initiale connue.

Les modèles par cumul de dommage correspondent à l'accumulation de dommages subis jusqu'à l'atteinte d'une valeur limite au-delà de laquelle le système ne fonctionne plus comme attendu. La résistance correspond alors à un seuil à ne pas franchir et les sollicitations correspondent aux dommages cumulés. C'est par exemple le cas de la fatigue mécanique ou thermique d'un matériau.

A la différence des modèles de dégradation par perte de résistance, les modèles par cumul de dommages doivent être présentés sous forme incrémentale des sollicitations fonctionnelles ou environnementales.

Davantage d'information sur les modèles de détérioration est disponible à l'annexe 4.

4.3 Présentation des modèles

L'objectif de ce chapitre est de présenter plusieurs modèles qui seraient les plus susceptibles d'être utilisés pour modéliser la probabilité d'événements liée à un système selon l'Ineris après une revue de la littérature. Il n'a pas pour vocation d'être exhaustif. Les modèles suivants sont présentés.

Caractéristiques Modèles	Familles de modèles	Déterministes ou probabilistes	Données statistiques ou physiques	Durée de vie ou détérioration	Données d'entrée	Données de sortie
<u>Distributions non paramétriques</u> : Méthode Kaplan Meier, méthode des rangs médians	Statistique	Probabiliste	Statistiques	Durée de vie	<u>Kaplan Meier</u> : temps de défaillance et statut de censure <u>Rangs médians</u> : temps de défaillance ordonnés et statut de censure, taille de l'échantillon	<u>Kaplan Meier</u> : fonction de survie $S(t)$ – probabilité que le système soit fonctionnel à la date t <u>Rangs médians</u> : Probabilité cumulée de défaillance à la date t_i
<u>Distributions paramétriques</u> : lois exponentielle, Weibull, Binomiale...	Statistique	Probabiliste	Statistiques	Durée de vie	Temps de défaillance, nombre d'observations, durée d'observation totale, statut des censures, taille de l'échantillon	Probabilité d'occurrence à la date t , taux de défaillance, probabilité cumulative, espérance, variance, intervalle de confiance
<u>ARMA</u>	Statistique	Probabiliste	Statistiques	Détérioration	Série temporelle de l'état du système ou de l'évolution d'une dégradation, condition opératoires	Evolution de la dégradation, probabilité de défaillance
<u>Processus stochastique</u> : Gamma, Wiener, Poisson, markoviens	Processus stochastiques	Probabiliste	Statistiques	Détérioration	<u>Gamma, Wiener</u> : série temporelle de l'évolution de l'état (continu) du système ou de l'évolution d'une dégradation, état initial <u>Poisson</u> : nombre de défaillances sur les intervalles de temps <u>Markoviens</u> : enregistrements des états du système à différentes dates, état initial	<u>Gamma, Wiener</u> : évolution de la dégradation, date estimée de la défaillance, durée de vie résiduelle <u>Poisson</u> : probabilité d'un nombre de défaillances dans un intervalle de temps <u>Markoviens</u> : temps de défaillance, distribution stationnaire des états du système
<u>Réseaux bayésiens dynamiques</u> : Filtre de Kalman, filtres particuliers, modèles markoviens	Réseaux bayésiens	Probabiliste	Statistiques	Détérioration	Etat initial, série temporelle du niveau de dégradation	Estimation de l'état à chaque instant, probabilité de défaillance
<u>Méthodes résistance-contraintes</u> : approches statistiques ou physiques	Physique-statistique ou mécano-probabiliste	Déterministe / probabiliste	Physiques / Statistiques	Durée de vie ou détérioration	<u>Suivant le modèle</u> : Etat initial, conditions opératoires, caractéristiques du systèmes, distributions de probabilités modélisant le stress ou la résistance ou valeurs fixes	<u>Suivant le modèle</u> : Probabilité de défaillance, durée de vie, modélisation de la dégradation, intervalle de confiance,

Tableau 6 : Synthèse des caractéristiques des modèles probabilistes

4.3.1 Distributions non-paramétriques

Les modèles basés sur les statistiques non-paramétriques ne font pas d'hypothèse sur la distribution sous-jacente de la fiabilité d'un système. De ce fait, ils ne reposent pas sur des familles de lois de probabilité paramétriques.

Parmi tous les modèles existants, nous proposons de présenter la méthode de Kaplan-Meier et la méthode des rangs médians qui font partis des plus utilisés.

4.3.1.1 Kaplan-Meier

La méthode de Kaplan-Meier permet de calculer la fiabilité à différents moments en tenant compte des événements de défaillance et des données censurées à droite.

Elle repose sur l'idée qu'être encore en fonctionnement à la date t , c'est être en fonctionnement juste avant t et ne pas avoir de panne à t .

On classe l'ensemble des défaillances dans l'ordre croissant, puis à chaque moment où une défaillance survient, la probabilité de survie est ajustée.

Pour un échantillon $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ de date de défaillances, l'estimateur de la survie est calculé à partir de l'expression suivante :

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_i < t} \frac{n_i - d_i}{n_i}$$

Avec n_i le nombre de survivants juste avant la date t_i et d_i le nombre de défaillances à l'instant t_i .

On rappelle que : $S(t) = 1 - F(t)$.

4.3.1.2 Méthode des rangs médians

La méthode des rangs médians permet d'estimer les probabilités de défaillance à partir de données censurées ou incomplètes. Elle peut être mise en œuvre pour décrire un retour d'expérience ou dans le cadre d'essais de fiabilité. Après avoir classé les temps de défaillance observés dans l'ordre croissant, on calcule la probabilité cumulée de défaillance :

$$P(i) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

Avec $P(i)$ la probabilité estimée de défaillance pour l'élément en position i , i le rang de l'élément (nombre d'observation de défaillances avant cet élément), et n le nombre total d'éléments considérés.

4.3.2 Distributions paramétriques : approche statistique de la durée de vie

Dans le cas des modèles paramétriques, on ajuste une distribution à un échantillon de données. Il est donc nécessaire de choisir un modèle approprié à partir de considérations physiques ou de connaissances a priori. Le modèle est ajusté à l'échantillon à l'aide d'outils statistiques, puis, si nécessaire, le modèle est validé à l'aide de la mise en œuvre de tests d'adéquations.

Loi de probabilité

Plusieurs distributions de probabilité peuvent être utilisées pour décrire un échantillon de données, chacune ayant des caractéristiques propres. L'annexe 1 présente quelques-unes de ces lois parmi les plus utilisées en sûreté de fonctionnement. Sont notamment présentées :

- la loi **exponentielle** qui est utilisée pour décrire la probabilité d'événements dans des conditions où les mécanismes dynamiques de vieillissement, d'usure, de corrosion, etc. sont négligeables, elle correspond aux cas d'un taux de défaillance constant qui ne convient généralement pas aux systèmes durant leur période tardive de vieillissement ;
- la loi de **Weibull** qui permet la représentation des différents scénarios d'évolution d'une dégradation avec des cinétiques de dégradation constante, croissante ou décroissante ;

- la loi **log-normale** qui également utilisée pour représenter le vieillissement, elle est notamment adaptée à la modélisation des résultats des essais de fatigue ;
- la loi **binomiale** pour modéliser les défaillances à la sollicitation ;
- ...

Ajustement de la distribution aux données

Une fois la distribution retenue, il s'agit de l'ajuster à l'échantillon de données. Pour cela, on pourra utiliser les méthodes suivantes :

- **méthodes des moments** : méthode paramétrique qui consiste à estimer les paramètres d'une loi de probabilité par identification de ses moments théoriques et empiriques (moyenne, variance...) ;
- **maximum de vraisemblance** : elle peut être mise en œuvre sous réserve que les observations soient mutuellement indépendantes et que l'on dispose de données en nombre suffisant. C'est la méthode qui a la meilleure performance asymptotique. Elle peut cependant nécessiter la mise en œuvre de solutions numériques pour résoudre les calculs s'ils sont trop complexes.
- **méthode de régression, moindres carrés** : elle consiste à appliquer les méthodes classiques de régression linéaire aux fonctions de répartition linéarisées par des transformations adéquates ; elle requiert l'utilisation de quantiles empiriques qui ne garantissent pas l'unicité des résultats ;

Tests d'adéquations

Les tests d'adéquation statistiques sont des procédures mathématiques utilisées pour vérifier si un ensemble de données suit une distribution théorique. Ils évaluent donc la correspondance entre la distribution observée de l'échantillon et le modèle théorique. Si les écarts entre les observations et les valeurs théoriques peuvent être attribuées au hasard, selon un risque consenti, alors on conserve l'hypothèse, sinon, on la rejette. Les tests les plus couramment utilisés sont le test du Chi-deux et le test de Kolmogorov-Smirnov.

Calcul de métriques de fiabilité

Par la suite, plusieurs métriques liées à la fiabilité des systèmes peuvent être calculées. Les plus utilisées sont l'espérance, la variance et les bornes de l'intervalle de confiance. Ces dernières caractérisent la fiabilité du système et sont donc utilisées dans les évaluations de risques du système étudié.

Illustrations

Des illustrations sont présentées en annexe 6. Deux cas d'application sont présentés.

- **Application 1 : modélisation de la fiabilité d'un système à partir de l'avis d'experts.** Les avis d'experts sur la valeur moyenne d'un paramètre de fiabilité et sur sa dispersion au travers de la variance ou des bornes de l'intervalle de confiance sont utilisés pour modéliser des lois de probabilité uniforme, triangulaire ou Gamma.
- **Application 2 : la modélisation de la fiabilité d'un système à partir de retour d'expérience ou de résultats d'essais de fiabilité.** Ces données sont utilisées pour calculer l'estimateur de la fiabilité d'un système via des méthodes statistiques fréquentistes (moyenne d'un échantillon ou calcul de la borne supérieure d'un intervalle de confiance sous l'hypothèse que la densité de probabilité suit une loi exponentielle).

4.3.3 Modèle ARMA

Le modèle ARMA est un modèle statistique utilisé pour modéliser la détérioration de composants. Il intègre deux composantes :

- **la composante autorégressive (AR)** qui implique que la valeur de la variable à un instant t est dépendante linéairement de ses propres valeurs antérieures ;

- **la moyenne mobile (MA)** implique que la variable dépend également des erreurs aléatoires passées. Ces erreurs représentent les chocs imprévus ou les variations aléatoires des observations précédentes.

Ainsi, les modèles ARMA incorporent à la fois des éléments déterministes (l'auto-régression) et stochastiques (la moyenne mobile), mais sont finalement classés parmi les modèles statistiques car ils reposent sur des principes statistiques pour modéliser les relations temporelles des données observées.

Il peut être mis en œuvre pour modéliser la dégradation de composants. Ce modèle a l'avantage de saisir les tendances ainsi que les motifs périodiques présents dans les données, offrant ainsi une base pour estimer la durée de vie résiduelle des composants. Le modèle $ARMA(p, q)$ est décrit par les équations suivantes :

$$X_t = c + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

Avec X_t la variable temporelle à l'instant t , $\phi_1, \dots, \phi_p$ des coefficients autorégressifs, ε_t le terme d'erreur à l'instant t , c une constante, $\theta_1, \dots, \theta_q$ les coefficients de la moyenne mobile.

L'application du modèle ARMA à la modélisation de la détérioration des composants exige que les données soient stationnaires, c'est-à-dire que leurs propriétés statistiques demeurent constantes dans le temps. Il est essentiel d'identifier les tendances, les saisons et les cycles avant de procéder à l'ajustement du modèle ARMA.

Les paramètres du modèle ARMA peuvent être estimés à l'aide de techniques telles que la méthode des moindres carrés ou le maximum de vraisemblance. Une fois le modèle ajusté, il permet de prédire les futurs états de détérioration des composants.

4.3.4 Processus stochastiques

Un processus stochastique à temps discret est une suite de variables aléatoires X_n , $n \in \mathbb{N}$ et un processus stochastique à temps continu est une famille de variables aléatoires X_t , $t \in \mathbb{R}$.

Il existe de nombreux processus stochastiques, ayant chacun leurs caractéristiques propres (accroissement indépendant ou non, accroissement stationnaire ou non...) et donc étant adapté ou non à la modélisation d'un problème particulier.

On peut citer comme exemple de processus les plus utilisés : le processus Gamma, le processus de Wiener, les processus de Poisson pour les processus à espaces d'états continu et les processus markoviens ou semi-markoviens pour les processus à espace d'états discrets. Pour chacun, il existe de nombreuses variantes permettant par exemple de tenir compte de covariables, de variabilité et/ou d'hétérogénéité (vis-à-vis de l'état initial, de la perturbation, du seuil...) ou bien de non-linéarité.

Une distinction importante relève de la loi qui est utilisée pour modéliser les accroissements, suivant qu'ils puissent être positifs, ou non-monotones. A titre d'illustration, on peut comparer un exemple de trajectoire d'un processus Gamma (trajectoire croissante) avec un exemple de trajectoire d'un processus de Wiener (trajectoires non monotones).

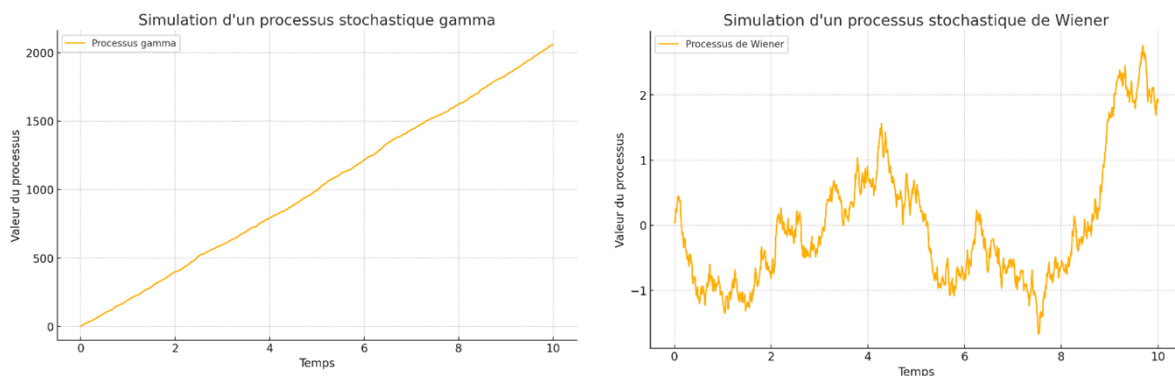


Figure 18 : Exemples de trajectoires d'un processus de Gamma (gauche) et d'un processus de Wiener (droite)

On peut relier les modèles stochastiques, qu'il s'agisse d'un modèle multi-état (discret) ou bien un modèle de détérioration (continu), à un modèle de durée de vie en considérant le temps nécessaire pour atteindre un état (panne) ou un certain seuil correspondant à un niveau de sécurité insuffisant.

De la même manière qu'avec la modélisation de la fiabilité à l'aide d'une distribution de probabilité, dans le cadre de la modélisation de la détérioration d'un système à l'aide d'un processus stochastique, les étapes suivantes peuvent être mise en œuvre :

- retenir processus stochastique pour modélisation la détérioration ;
- estimer les paramètres du modèle (maximum de vraisemblance, méthode des moments...) ;
- effectuer un test de significativité des coefficients pour valider l'ajustement ;
- calculer les métriques de fiabilité à partir de la fonction de survie obtenue (durée de vie, probabilité de défaillance...).

Il est à noter que les processus stochastiques sont à la fois basés sur la physique car l'évolution de la dégradation suit un phénomène physique et basés sur les statistiques car les paramètres des processus sont obtenus à partir d'observations statistiques.

A titre d'exemple, la dégradation peut être modélisée par un processus stochastique en fonction de l'état initial, de la dégradation qui dépend de l'historique de dégradation et de l'environnement pour toute l'histoire du système. L'identification des paramètres du modèle est effectuée à partir des observations issues de l'inspection ou d'essais. Bien que des modèles de type ARMA puissent également être utilisés, le processus Gamma et le processus de Markov (IMdR, 2014) sont les modèles stochastiques les plus utilisés dans la littérature pour représenter la dégradation. Ces approches sont souvent retenues pour les dégradations difficilement mesurables.

4.3.5 Réseaux bayésiens

Les approches basées sur les réseaux bayésiens décrivent l'état initial d'un système à l'aide d'une fonction de fiabilité conditionnelle, puis utilisent le principe du théorème de Bayes pour mettre à jour les estimations probabilistes.

Une fois qu'une fonction de fiabilité conditionnelle est déterminée, la fonction de durée de vie utile restante est définie comme le temps conditionnel prévu jusqu'à la défaillance ($T - t$), compte tenu de l'état actuel (x_t), qui peut ou non dépendre du temps. Les variantes de modélisation diffèrent non seulement par la manière dont elles calculent la fonction de fiabilité conditionnelle, mais également par les informations utilisées pour définir l'état actuel ($Z(t)$). On distingue : les réseaux bayésiens statiques qui ne représentent pas l'évolution des variables aléatoires des réseaux bayésiens dynamiques qui représentent l'évolution des variables aléatoires. Parmi les réseaux bayésiens dynamiques, on trouve :

- les modèles de Markov et de semi-Markov cachés ;
- le filtre de Kalman ;
- les filtres particuliers.

Les modèles bayésiens dynamiques peuvent par exemple être utilisés pour mettre à jour les modèles de dégradation grâce aux données de l'inspection sur les valeurs représentatives de la dégradation (par exemple des mesures d'épaisseur).

4.3.6 Méthodes résistance-contrainte

4.3.6.1 Généralités

Les méthodes résistance-contrainte (R-C) sont des méthodes de quantification utilisées principalement dans le domaine de la fiabilité des structures et des systèmes mécaniques. C'est une méthode qui permet de comparer la résistance d'un produit aux sollicitations (contraintes) auxquelles il est soumis pour déterminer une éventuelle défaillance. Il s'agit donc d'une méthode à la frontière entre les méthodes physiques et les méthodes statistiques. On parle de méthode physique-statistique ou mécano-fiabiliste.

L'équation de la défaillance s'écrit comme suivant :

$$Z = R - C$$

Lorsque $C > R$ une défaillance survient.

Avec,

- **C la contrainte**, c'est-à-dire la charge ou la demande exercée sur le produit ou la structure. Elle peut être exprimée en termes de force, de pression, etc. et est souvent causée par des facteurs externes tels que la charge appliquée, les conditions environnementales ou des forces internes ;
- **R la résistance** qui représente la capacité d'un produit ou d'une structure à supporter une contrainte sans défaillance. Elle est exprimée de la même façon que la contrainte. Par exemple, la résistance à la traction indique la force maximale qu'il peut supporter avant de rompre ;
- **Z correspond à la marge**, on a $Z \geq 0$.

La méthode résistance-contrainte peut s'appliquer de manière déterministe ou probabiliste.

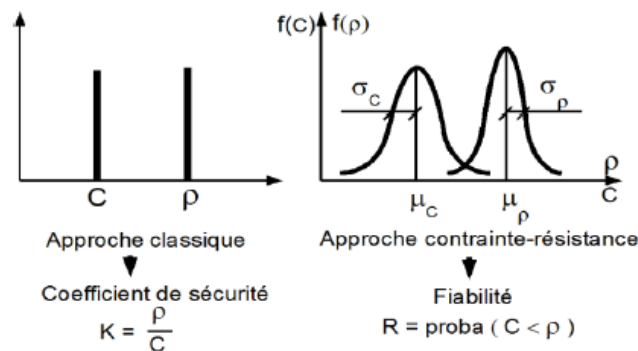


Figure 19 : Méthode résistance-contrainte déterministe (gauche) et probabiliste (droite)

Dans le contexte déterministe, l'application de la méthode consiste à surdimensionner le système par un coefficient de sécurité. Ces derniers sont généralement imposés par des normes ou peuvent être issus de la littérature. C'est l'approche généralement utilisée pour le dimensionnement des structures.

Dans le contexte probabiliste, on définit la probabilité P_f de défaillance comme la probabilité que la contrainte C dépasse la résistance R .

$$P_f = P(C > R)$$

Il est alors nécessaire de connaître les densités de probabilité de la contrainte $f_C(c)$ et de la résistance $f_R(r)$. Pour des distributions indépendantes, la probabilité de défaillance peut être exprimée comme suivant :

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_C(c) f_R(r) dc dr$$

Avec l'expression de la fonction de répartition, il vient :

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} F_R(y) f_C(y) dy$$

Si R et C suivent des lois normales, on a le coefficient de sécurité β , avec μ la moyenne et σ l'écart-type :

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_C}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_C^2}}$$

En pratique, les modèles sont souvent plus complexes et incluent de nombreuses variables aléatoires. Il est alors nécessaire d'utiliser des méthodes numériques pour déterminer la probabilité de défaillance

ou la valeur du coefficient de sécurité. Le calcul de cette probabilité peut se faire au moyen des approches suivantes (IMdR, 2014) :

- **Simulations de Monte Carlo**, en intégrant les mécanismes de dégradation et les processus de chargement. Cette approche est envisageable lorsque les probabilités recherchées sont élevées et le modèle de comportement de la structure dégradée est explicite. Dans les autres situations, le temps de calcul rend impossible l'utilisation de cette approche.
- **Méthodes de fiabilité du premier et du second ordre (FORM / SORM)** en résolvant le problème de fiabilité à chaque pas de temps (i.e. tous les ans ou tous les mois de la durée de vie). Cette méthode est applicable lorsque la marge de sécurité est monotone décroissante, et lorsque le nombre de variables aléatoires est faible.
- **Méthodes asymptotiques** au moyen d'une simplification du problème, basée sur les intégrations asymptotiques dans le cadre des processus gaussiens différentiables et des processus de renouvellement à saut rectangulaire.

Il est clair que dans cette approche, la distribution obtenue ne correspond pas forcément à une loi théorique connue. La queue de distribution est généralement mieux décrite par cette approche, étant donné que le calcul de fiabilité se fait de façon précise. Il peut néanmoins nécessiter des temps de calcul très longs.

Il est à noter que les méthodes résistance-contrainte permettent de tenir compte de plusieurs types de contraintes subies par les pièces (contraintes statiques, la fatigue due à un grand nombre de cycles, la fatigue oligo-cyclique⁷, l'usure...) et qu'elles peuvent décrire à la fois les cycles et pics de contraintes tout comme les caractéristiques statiques de résistance des matériaux pour chaque type de contrainte (résistance à la rupture, limite élastique, limite de fatigue, facteur K de fissuration ; en prenant en compte les aléas liés au matériau : hétérogénéité, vieillissement...).

4.3.6.2 Modèles physiques de détérioration

Parmi les approches de gestion du vieillissement, la modélisation de la dégradation est un point clé déterminant pour toute l'évaluation des risques. En effet, la dégradation des structures peut correspondre à une diminution irréversible de la marge de sécurité (diminution de la résistance, augmentation de la sollicitation, ou cumul d'un dommage) qui augmente de fait la probabilité de défaillance. Une synthèse de ces approches a été réalisée dans (IMdR, 2014).

La dégradation peut être soit mesurable, au moyen d'indicateurs physiques (e.g. déformation, longueur de fissures) ou statistiques (e.g. taux de pannes), soit non mesurable (e.g. endommagement). Cette deuxième catégorie est assez difficile à considérer puisqu'elle ne fournit aucun signe de déviation ou de faiblesse, avant la défaillance.

Il existe de très nombreux modèles physiques qui permettent de modéliser des mécanismes de détérioration précis. Il est par exemple possible de modéliser les mécanismes suivants.

Mécanismes de dégradation des systèmes mécaniques	Mécanismes de dégradation des systèmes électriques et électroniques
- Rupture par fissuration - Fatigue - Fluage - Usure - Erosion - Grippage - Corrosion - Effet des cycles de gel-dégel - Pénétration d'humidité dans les composites	- Dégradation mécanique - Dégradation thermique - Dégradation thermomécanique - Dégradation diélectrique - o Claquage électronique - o Claquage thermique - o Claquage par filamentation

Tableau 7 : Principaux mécanismes de dégradation des systèmes mécaniques, électriques et électroniques

⁷ Oligo-cyclique : mécanisme de fatigue se produisant après un nombre limité de cycles entre plusieurs phases de fonctionnement. Le matériau subit une contrainte élevée proche de sa limite d'élasticité, ce qui entraîne une déformation plastique significative à chaque cycle.

Le modèle de dégradation doit être alimenté par les données à la disposition de l'analyste. Ces données résultent des essais ou des inspections, sous la forme de mesures de conditions de service et de dommages observés, mais elles peuvent aussi résulter des estimations obtenues par des avis d'experts, combinés (ou non) aux mesures disponibles (inspection) et bénéficier du retour d'expérience des défaillances lorsqu'une défaillance est constatée. L'évaluation de la dégradation mécanique des équipements nécessite la connaissance, aussi précise que possible, des différents types d'informations :

- propriétés de la résistance et des modules du matériau ;
- dimensions géométriques et défauts externes et internes ;
- règles pour la combinaison des différentes propriétés lorsque le composant est formé de plusieurs matériaux ;
- effets du temps et des dégradations (e.g. variations géométriques, évolution de la résistance) ;
- conditions environnementales, impact de la maintenance, profil de fonctionnement.

Du fait de la multiplicité des modèles, il n'est pas possible de tout développer dans le cadre de ce rapport. Cependant, le lecteur pourra consulter l'annexe 7 qui propose un cas d'application des modèles physiques de dégradation de systèmes d'une station-service hydrogène.

Pour modéliser la résistance, les modèles physiques peuvent être utilisés dans des approches déterministes, sans notion statistique, ou dans des approches probabilistes intégrant des variables aléatoires. La première approche génère une donnée unique de comparaison entre résistance et contrainte, alors que la seconde détermine une probabilité que la contrainte dépasse la résistance. De même, les approches peuvent être réalisées à un instant t (par exemple au moment de la conception) ou en fonction du temps (évaluation de défaillance dans le temps).

Les modèles déterministes suggèrent des trajectoires uniques de dégradation, pour lesquelles la connaissance de l'état au point de départ permet l'extrapolation à un âge quelconque de la structure. Ces trajectoires sont obtenues à partir de la résolution d'équations modélisant le comportement du système ou du matériau dans des conditions d'exploitation propre au fonctionnement et à l'environnement. Ces approches ne permettent pas de déterminer une probabilité de défaillance.

Les méthodes R-C permettent cependant d'évaluer une probabilité de défaillance dès lors que l'on intègre des incertitudes dans les modèles par le biais de variables aléatoires.

4.3.6.3 Incertitudes dans les modèles R-C

Historiquement les modèles de dégradation ont été formulés sous l'angle déterministe, en proposant des durées de vie et des trajectoires de dégradation uniques à chaque configuration. Cependant, les résultats expérimentaux ont toujours montré une grande variabilité des résultats inhérente aux phénomènes physiques.

Afin de tenir compte de cette variabilité, des lois de dégradation sous forme probabiliste ont été définies. Elles nécessitent donc de choisir une loi de probabilité adéquate. Pour cela, il existe 2 méthodes.

- si l'on possède suffisamment de données, on peut se tourner vers les méthodes statistiques paramétriques (cf. paragraphe 4.3.2) ;
- sinon, on tâchera de définir des modèles physiques dits probabilistes, c'est-à-dire qu'ils intègrent les incertitudes dans l'évaluation.

Les incertitudes dans les modèles physique de comportement peuvent être de plusieurs origines :

- **incertitude de résistance** (méthodes de fabrication et de stockage sur la résistance et la raideur, contrôle de qualité de la géométrie et des défauts, données de dégradation des inspections...) ;
- **incertitudes de contrainte** (environnement, historique de chargement, mesure des contraintes....) ;
- **incertitudes de modèle** (erreur du modèle...)

On peut également considérer que ces incertitudes résultent de deux causes : 1) la dégradation inhérente au système en fonction des conditions de service prévues à l'avance, et 2) l'imperfection dans la prévision des conditions opérationnelles, de l'état du système et des modèles de dégradation.

Les modèles physiques probabilistes consistent à définir une distribution engendrée par une variabilité paramétrique dans le modèle considéré. La dégradation est donc probabiliste et dépend de la valeur des variables du modèle. On notera que la dégradation peut être modélisée et probabilisée ou directement considérée comme une variable aléatoire issue d'une loi paramétrique.

Il est par exemple envisageable de probabiliser la courbe Wöhler utilisée pour modéliser la fatigue d'un composant. Pour ce faire, on s'appuie sur les intervalles de confiance de la courbe et on trace les courbes de densité de probabilité en fonction du nombre de cycle pour une contrainte donnée. En fixant la valeur de la contrainte, il est alors possible d'identifier le fractile du nombre de cycle correspondant à un niveau de confiance prédéfini.

Les modèles physiques probabilistes présentent les avantages des modèles physiques dans la mesure où ils permettent de décrire les mécanismes d'endommagement des systèmes sous l'effet de contraintes fonctionnelles ou liées à l'environnement et de décrire la cinétique d'évolution de l'état du système, à cela, s'ajoute la prise en compte des incertitudes permise par la dimension probabiliste. L'intérêt de ces modèles est notamment de permettre la réalisation des études de sensibilité au paramètre de la durée de vie. Cela permet ensuite en pratique de cibler les données devant être consolidées.

In fine, la modélisation de la durée de vie via ces modèles implique la connaissance de l'état actuel du système ou du composant, de la cinétique de dégradation et de l'évolution future de l'environnement d'exploitation. Les approches physiques et statistiques permettent alors l'estimation de la durée de vie correspondante à une probabilité de dépassement de la résistance dégradée d'une structure par la contrainte.

4.4 Processus de modélisation de la probabilité

Les méthodes de modélisation de la probabilité présentées ont chacune leurs spécificités et contraintes. Néanmoins, de manière générale, les étapes suivantes peuvent être mises en œuvre pour modéliser la probabilité à partir de données collectées préalablement.

1. **Description du système étudié.** Dans un premier temps, il est nécessaire d'identifier les différents composants et de décrire leur fonctionnement et leur design en termes de géométrie, de matériaux utilisés. On décrira également les conditions d'exploitation : les paramètres de fonctionnement (pression, température, voltage, intensité...), la nature des fluides impliqués, l'environnement (humidité, température, pollution, acidité...).
2. **Identification des causes et modes de défaillances.** Dans un second temps, la réalisation d'analyse de risques (AMDEC, APR, AdD), le jugement d'experts ou bien, l'analyse de retour d'expérience qualitatif d'installation ou de systèmes comparables permettra d'identifier les causes et modes de défaillances. On analysera également la dépendance entre les différentes causes. En effet, l'occurrence de certains modes de défaillances peut être la conséquence de différentes causes qu'elles surviennent de manière alternée ou concomitante.
3. **Modélisation des causes.** Dans un troisième temps, à partir des informations collectées, issues de recueils de données de probabilité, de retour d'expérience, d'avis d'experts ou des résultats d'essais de fiabilité, il s'agit de mettre en œuvre les outils de modélisation présentés au paragraphe 4.3.
4. **Mise en forme du résultat, vérification et validation.** Selon la méthode mise en œuvre, le résultat est exploitable directement dans une étude de sécurité ou il peut nécessiter d'être mis en forme. Dans ce dernier cas, le calcul de paramètres dérivés de la probabilité obtenue peut être nécessaire (par exemple calculer l'estimateur de la fréquence de défaillance à partir de la densité de probabilité ou bien la probabilité de durée de vie moyenne à partir d'une trajectoire de détérioration). En complément, on pourra évaluer l'incertitude du résultat et mener une étude

de sensibilité sur les différents critères et paramètres du modèle. Les résultats obtenus pourront être confrontés à des données issus d'un autre mode de collecte (i.e. bases de données, l'avis d'experts, les essais de fiabilité ou la collecte de retour d'expérience) et corrigés au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données.

4.5 Evaluation de la qualité des modèles

Une fois les données collectées, il s'agit de retenir une ou plusieurs approches / techniques parmi l'ensemble des outils de modélisation et de pondération. Pour ce faire, les modèles sont étudiés vis-à-vis de leur qualité et leur adéquation au problème considéré.

Le rapport (IMdR, 2024) reprend de la littérature les considérations relatives à la sélection d'un modèle approprié regroupées en quatre catégories sous forme de questions auxquelles il faut répondre afin d'évaluer l'adéquation d'un modèle à une configuration particulière.

1. Exigence de prévision : Que doit réaliser la prévision de la probabilité ?

Ce groupe de critères concerne le besoin auquel répond le pronostic. Pour une sélection de modèle appropriée, l'utilisateur doit identifier : (i) le niveau de granularité du système pour lequel l'estimation de la probabilité est requise, (ii) l'exactitude de prévision requise et (iii) la précision requise. On se questionne également sur la forme que doivent prendre les résultats, cherche-t-on à estimer la durée de vie ou l'évolution de la détérioration du système ?

2. Adéquation modèle-processus : le modèle peut-il décrire la réalité ?

Ce groupe de critères est lié à la capacité de chaque type de modèle, avec sa conception, ses hypothèses et ses paramètres associés, à décrire le processus réel modélisé. Les considérations comprennent : (i) le type de processus (statique / dynamique, linéaire / non linéaire, avec ou sans retour, simple / multivarié), (ii) le type et le niveau de bruit du processus et de mesure, et (iii) la complexité du système, (iv) le type de défaillance ou détérioration que l'on modélise.

3. Besoins en ressources : les ressources sont-elles disponibles pour entreprendre la modélisation ?

Ce groupe de critères concerne la disponibilité des ressources pour concevoir / développer, maintenir et utiliser les modèles. Les ressources spécifiques d'intérêt sont les suivantes : (i) les données (quel type, quelle quantité et de quelle qualité), (ii) les compétences et l'expertise du personnel requis pour entreprendre d'abord la modélisation, puis pour expliquer les résultats aux utilisateurs métier.

Une donnée de qualité est une donnée qui présente un certain nombre de qualités essentielles permettant d'effectuer des précisions fiables et précises. Voici quelques-unes des caractéristiques d'une donnée de qualité :

- **Précision** : Les données doivent être précises et exemptes d'erreurs ou de bruit. Des données inexactes peuvent entraîner des prévisions incorrectes et biaiser les résultats du modèle.
- **Complétude** : Les données doivent être complètes, c'est-à-dire qu'elles doivent couvrir toutes les variables pertinentes. Des données incomplètes peuvent entraîner des lacunes dans la compréhension des modèles et des prévisions moins fiables.
- **Représentativité** : Les données doivent être représentatives de la population ou du phénomène que le modèle cherche à modéliser. Des données non représentatives peuvent conduire à des biais dans les prévisions du modèle.
- **Cohérence** : Les données doivent être cohérentes et uniformes en termes de format, de structure et de qualité. Des données incohérentes peuvent rendre difficile la construction de modèles fiables et entraîner des résultats imprécis.
- **Actualité** : Les données doivent être à jour et refléter les conditions récentes du système ou du phénomène étudié. L'utilisation de données obsolètes peut conduire à des prévisions non pertinentes ou non valides.
- **Équilibre** : Les données doivent être équilibrées en ce qui concerne la répartition des classes ou des événements à prédire. Un déséquilibre peut entraîner un biais dans les prévisions du modèle en faveur des classes majoritaires.

4. Maturité de l'approche : l'approche de modélisation est-elle suffisamment éprouvée pour être fiable ?

Ce critère décrit dans quelle mesure une approche particulière s'est avérée efficace pour le pronostic de la probabilité et est lié au niveau de risque qu'un utilisateur est prêt à accepter lorsqu'il envisage une technique de modélisation pour une application spécifique. Les niveaux

de risque les plus élevés seront associés aux techniques pour lesquelles seuls des résultats théoriques ou obtenus par simulation ont été publiés, tandis que les techniques bien établies, fournies sous forme de logiciels disponibles dans le commerce et utilisés dans un large éventail d'industries pour diverses applications pertinentes, offriraient le risque le plus faible.

4.6 Caractéristiques des modèles de la probabilité

Méthodes	Avantages	Limites et contraintes	Quand l'utiliser	Quand l'éviter
Méthodes non paramétriques : Kaplan-Meier, rangs médians	Techniques simples à utiliser et à expliquer qui permettent d'estimer la distribution de probabilité sans faire l'hypothèse de paramètres. Ne nécessitent pas de décrire précisément les mécanismes de dégradation d'un point de vue physique. Ne nécessitent pas de faire l'hypothèse sur une forme de distribution de probabilités. Permettent de calculer la fiabilité globale du système en incluant toutes les causes de défaillance.	Méthode sensible aux biais si les données ne sont pas représentatives de toutes les causes et modes de défaillance. Jeux de données de taille significative.	Mode de défaillance unique défini, associé à un seul paramètre observé (ou calculé) qui peut être décrit par une tendance monotone. Les conditions d'exploitation sont stables ou n'affectent pas le paramètre surveillé. Les mesures sont reproductibles, fiables et peu sensibles au processus de mesure (par exemples, les capteurs en ligne).	La défaillance naissante ne peut pas être associée à une simple entrée mesurable. Les conditions d'exploitation sont variables ce qui affecte le paramètre mesure sans être liées à la défaillance. La tendance n'est pas monotone. Les données dépendent fortement du processus de mesure. Les données sont fortement sensibles à l'erreur du processus ou de mesure ;
Fonctions de densité : exponentielle, Gamma, binomiale, Weibull, lognormale...	Les modèles sont simples, couramment utilisés et bien compris. Ne nécessitent pas de décrire précisément les mécanismes de dégradation d'un point de vue physique. Permettent de calculer la fiabilité globale du système en incluant toutes les causes de défaillance. Les modèles permettent de calculer facilement des intervalles de confiance permettant d'évaluer la confiance que l'on a dans les résultats. Les résultats sont facilement interprétables. Ces modèles peuvent être utilisés pour modéliser la fiabilité de composants de l'entière du système. Ces modèles peuvent être utilisés en ne surveillant que la date de défaillance des dispositifs et sans avoir besoin de connaître l'évolution de la détérioration. Selon la fonction de densité retenue, on peut modéliser un taux de défaillance constant, croissant ou décroissant.	Les défaillances doivent être indépendantes. La modélisation de la durée de vie ne permet pas de rendre compte de l'état du système. Si la modélisation repose sur les statistiques fréquentistes, le jeu de données doit être important. Le jeu de données doit être représentatif de la configuration, de l'ensemble des modes de défaillance. Le modèle suppose que l'occurrence de la défaillance est fonction du temps d'opération plutôt que de la variation de facteurs de risques externes.	Lorsque les données de surveillance rendant compte des états du système ne sont pas forcément connues, ni l'état de la détérioration.	Lorsque l'on ne dispose pas de suffisamment de données représentatives de la configuration et des défaillances.
Modèles ARMA	Les données historiques de défaillances ne sont pas requises. Ne nécessitent pas de compréhension des mécanismes de défaillance détaillée. Permettent de calculer la durée de vie résiduelle.	Les modèles ARMA de base supposent que le processus et l'erreur soient stationnaires. N'intègre pas les connaissances préalables ou d'experts. Sensible au bruit ou aux conditions initiales. Un volume de données important est nécessaire pour le développement et la validation du modèle. Les prévisions à long terme sont moins fiables. Doivent être complétés par d'autres méthodes de modélisation de la fiabilité pour inclure les causes qui ne sont pas liées à des mécanismes de détérioration.	Le taux de défaillance est une relation linéaire des covariantes et du bruit. Les prévisions à court terme sont requises. Le taux de défaillance dépend de la durée d'exploitation (par exemple, distribution exponentielle). Les données de mesure sont disponibles pour la modélisation et l'application mais non les données historiques de défaillance.	Le taux de défaillance n'est pas une relation linéaire des covariantes et du bruit. Quand les données historiques et expertes sont disponibles en addition aux données de mesure. Les prévisions à long terme sont requises. Manque de données pour la construction et la validation de modèle.
Processus stochastiques :	<u>Gamma, Wiener</u>	<u>Tous</u>	<u>Gamma, Wiener</u> Le processus de Wiener est souvent utilisé pour modéliser les phénomènes de	<u>Gamma, Wiener</u> On ne dispose pas de données historiques permettant d'estimer les paramètres du modèle.

Méthodes	Avantages	Limites et contraintes	Quand l'utiliser	Quand l'éviter
Gamma, Wiener, markoviens	Ils permettent une modélisation du temps continu et donc la détérioration et la dégradation au fil du temps. Ne nécessite pas de décrire précisément les mécanismes de dégradation d'un point de vue physique. Ces modèles sont utilisés pour modéliser différents types de dégradation sans avoir à connaître précisément les mécanismes. <u>Markoviens</u> L'approche est bien établie et capable de modéliser de nombreux designs de systèmes et scénarios de défaillance. Peut facilement gérer des ensembles de données incomplets. Efficace en termes de calculs, une fois développée.	Doivent être complétés par d'autres méthodes de modélisation de la fiabilité pour inclure les causes qui ne sont pas liées à des mécanismes de détérioration. <u>Gamma, Wiener</u> Les simulations ou les équations analytiques peuvent se révéler complexes à résoudre. Il est nécessaire de disposer des données sur l'évolution de l'état du système pour paramétrer le modèle. Ces modèles ne rendent pas bien compte des facteurs influents externes non stationnaires, tels que des changements brusques de l'environnement. Dans leur forme de base ces modèles ne tiennent pas compte de l'effet de covariables. <u>Markoviens</u> Un volume de données relativement large est requis pour l'entraînement. Suppose un seul modèle de détérioration / défaillance monotone et non-temporel (c'est-à-dire, que les différents stades de défaillance ne peuvent pas être pris en compte). Ne peut pas modéliser les défaillances non-anticipées et/ou les causes racines. Les modèles semi-Markov plus complexes sont nécessaires si les défaillances ou les temps de progression de défaillance ne sont pas distribués exponentiellement.	dégradation fluctuants, aléatoires et réversibles. Tandis que le processus de Gamma est adapté aux systèmes où la dégradation est monotone et cumulative (e.g. l'usure d'un matériau ou l'accumulation de stress). <u>Markoviens</u> Simple à développer et à mettre en œuvre. Des données incomplètes ou multivariées sont disponibles. Les causes racines des défaillances sont connues. La configuration du process et de l'usine est relativement statique ou le réseau est à jour. Les estimation RUL relativement exactes et précises sont requises	<u>Markoviens</u> Les systèmes sont réparables. Données de mesure temporelle en tant qu'entrées de modèle. Manque de données sur le mode de défaillance pour l'entraînement. La défaillance modélisée a plus d'un stade discret (par exemple, l'initiation de fissure, croissance, rupture finale, etc.).
Réseaux bayésiens : modèles markoviens, filtre de Kalman, filtres particuliers	<u>Markoviens</u> Peut modéliser les différents stades de détérioration, ainsi la tendance de défaillance peut ne pas être monotone. Peut modéliser les données spatiales et temporelles. La connaissance spécifique des mécanismes de défaillance n'est pas requise. Peut facilement gérer des ensembles de données incomplets. <u>Filtre de Kalman</u> Peut être utilisé pour modéliser les processus multivariés et dynamiques. Le filtre de Kalman basique est efficace en termes de calcul, notamment pour les systèmes ayant un nombre d'états important. Peut traiter les mesures incomplètes ou bruitées. Les variantes sont disponibles pour les processus non-linéaires. D'autres avantages dépendent de la technique bayésienne sous-jacente. <u>Filtres particuliers</u>	<u>Tous</u> Doivent être complétés par d'autres méthodes de modélisation de la fiabilité pour inclure les causes qui ne sont pas liées à des mécanismes de détérioration. <u>Markoviens</u> Un grand volume de données d'entraînement est requis, proportionnellement au nombre d'états cachés. Ne peut pas modéliser les défauts non-anticipés et/ou les causes racines. Des modèles de semi-Markov caché plus complexes sont requis si les défaillances ou les temps de progression de défaillance ne sont pas distribués exponentiellement. Nécessite beaucoup de calculs, particulièrement si le nombre des états cachés est important. <u>Filtre de Kalman</u> Les erreurs du processus et de mesure doivent être gaussiennes Certaines variantes divergent facilement. Les variantes pour les systèmes non-linéaires sont plus gourmandes en calculs que les filtres de Kalman de base. Données de mesures requises.	<u>Markoviens</u> Les systèmes sont réparables. Et les causes racines sont connues. La défaillance modélisée a plus d'un stade discret. Les données temporelles sont utilisées en tant qu'entrées de modèle. <u>Filtre de Kalman</u> La distribution a posteriori est multivariée. L'erreur est additive. Les données de surveillance de l'état sont disponibles. <u>Filtres particuliers</u> Distribution a posteriori multivariée et non-standard. L'erreur est non-linéaire et non-gaussienne. <u>Réseau bayésien statique</u> Des données incomplètes ou multivariées sont disponibles. Les causes racines des défaillances sont connues.	<u>Markoviens</u> Manque de données sur le mode de défaillance pour l'entraînement. Le matériel approprié pour le calcul n'est pas disponible. <u>Filtre de Kalman</u> Erreur multiplicative. Distribution a posteriori à variable unique. Les données de covariables ne sont pas disponibles pour la défaillance en question. <u>Filtres particuliers</u> Distribution a posteriori déterministe typique. L'erreur est linéaire et gaussienne. L'erreur est multiplicative. La distribution a posteriori est à variable unique. Les données de covariables ne sont pas disponibles pour la défaillance en question. <u>Réseau bayésien statique</u> Les causes racines des défaillances ne sont pas connues.

Méthodes	Avantages	Limites et contraintes	Quand l'utiliser	Quand l'éviter
	Peut être utilisé pour modéliser les processus multivariés et dynamiques. L'erreur peut ne pas être linéaire, ni gaussienne. Les variantes pour les processus non-linéaires sont plus exactes que celle de filtre de Kalman. D'autres avantages dépendent de la technique bayésienne sous-jacente. <u>Réseau bayésien statique</u> Peut gérer facilement les ensembles de données incomplets. Permet/force l'utilisateur à étudier la relation causale. Capte et intègre les connaissances d'experts. Les algorithmes sont disponibles pour éviter le surajustement des données. Les logiciels sont disponibles pour la modélisation. Les limites de confiance sont intrinsèquement fournies.	D'autre inconvénients dépendent de la technique bayésienne sous-jacente. <u>Filtres particuliers</u> Un grand nombre d'échantillons (ou de rééchantillonnage) est nécessaire pour éviter le problème de dégénérescence. Peut-être plus gourmand en calcul que les filtre de Kalman de base. Données de mesures requises. D'autre inconvénients dépendent de la technique bayésienne sous-jacente. <u>Réseau bayésien statique</u> Ne peut pas modéliser une défaillance non-anticipée / ou une cause racine. Difficulté de calcul pour l'exploration d'un réseau jusque-là inconnu. Un réseau bayésien est utile uniquement si les connaissances préalables sont fiables. Les résultats peuvent être sensibles à la sélection de distribution antérieure. En plus des experts dans le domaine, les experts en modélisation sont nécessaires.	Les experts en modélisation sont disponibles.	Les experts dans le domaine ou en modélisation ne sont pas disponibles. Les données d'entraînement ne sont pas disponibles.
Méthodes basées sur la physique : Résistance-Contrainte	Fournissent des estimations précises pour chaque mécanisme de dégradation identifié et permettent de modéliser la cinétique de détérioration. Les résultats sont facilement interprétables.	Nécessitent la connaissance détaillée et complète du comportement du système et de ses différents états, la compréhension des mécanismes de dégradation et la connaissance précise des paramètres opératoires et environnementaux. La précision et la robustesse des résultats sont sensibles aux conditions d'expérimentation dans quelques les modèles ont été développés. Le paramétrage des modèles physiques peut nécessiter d'utiliser des résultats d'essais ou issus de la littérature dans des conditions qui doivent être similaires ou proches de celles étudiées. Certaines méthodes peuvent nécessiter l'emploi de méthodes de résolution numériques basées sur la simulation. Doivent être complétées par d'autres méthodes de modélisation de la fiabilité pour inclure les causes qui ne sont pas liées à des mécanismes de détérioration. Doivent être complétées d'une étude sur l'influence des covariables et adaptées si nécessaire.	Les modèles de défaillances sont connus et bien compris. Tous les mécanismes de dégradation peuvent être modélisés. Les données sur les processus, les conditions d'exploitation doivent être disponibles.	Lorsque les modèles physiques ne sont pas disponibles.

Tableau 8 : Caractéristiques des méthodes de modélisation de la probabilité

5 Méthodes d'obtention de la probabilité par la pondération

En complément du chapitre 4 sur les méthodes de modélisation de la probabilité, ce chapitre présente des méthodes pouvant être utilisées pour pondérer une probabilité connue au préalable afin de l'adapter à une configuration nouvelle pour laquelle on n'en dispose pas.

La donnée d'entrée peut ainsi être une donnée déjà connue pour une autre configuration, une donnée obtenue via les méthodes de collecte présentées au chapitre 3, ou encore un résultat issu d'une modélisation détaillée présentée au chapitre 4.

Le choix a été fait de présenter ces méthodes en marge des autres méthodes de modélisation de la probabilité dans la mesure où elles peuvent utiliser les résultats des méthodes du chapitre 4 comme données d'entrée.

5.1 Principes généraux de la démarche de pondération des probabilités

En l'absence de données issues de retour d'expérience adéquat pour quantifier des probabilités de d'événements, on peut être tenté d'utiliser des données issues de recueils ou de bases de données spécifiques ou génériques. De la même manière, lorsque l'on cherche à évaluer la dégradation d'un équipement, on peut être tenté d'utiliser des données partielles ou bien issues d'équipement « similaires ».

Cependant, dans certains cas, l'écart entre les installations qui ont été utilisées pour obtenir ces données et les installations correspondantes au système étudié est trop important. C'est-à-dire que, par exemple, le design des installations, les procédés employés, les conditions d'exploitation ou la maintenance présentent des différences majeures rendant les données disponibles non-adaptées au système étudié. Utiliser ces données conduirait alors à commettre des erreurs lors de la quantification de ces événements.

L'analyste peut donc chercher à pondérer les données disponibles à partir de ses connaissances des sources de données disponibles dans la littérature et de ses connaissances du système étudié qu'il collecte comme cela est explicité au chapitre 3. C'est-à-dire via le jugement d'experts, via l'observation de retour d'expérience ou par la réalisation d'essais de fiabilité.

Lors de la mise en œuvre d'une méthode de pondération des données, l'ensemble de la démarche repose sur la capacité de l'analyste à qualifier et à quantifier les écarts entre l'installation à l'origine des données que l'on pondère et le système.

On appelle *facteurs d'influence* l'ensemble des éléments internes ou externes qui ont pour effet d'agir sur la fiabilité du système. Leur influence peut aussi bien réduire le nombre de défaillances que l'augmenter. Cette notion regroupe un nombre large et divers de facteurs couvrant aussi bien la conception, la fabrication, l'installation, l'utilisation, la maintenance ainsi que l'aspect humain et organisationnel. Dans le cadre de ce chapitre, les facteurs d'influence doivent satisfaire les critères suivants :

- il est possible de mesurer ou d'évaluer l'état des facteurs pour chaque système ;
- les mesures ou évaluations des facteurs doivent permettre de faire des distinctions entre les systèmes étudiés ;
- les facteurs d'influence retenus sont suffisamment exhaustifs pour justifier à eux seuls les différences significatives en matière de fiabilité.

Dans le cadre de ce chapitre, plusieurs méthodes de pondération sont définies selon la nature des modèles et le type de données d'entrée disponible. Les méthodes suivantes sont présentées :

- la pondération via les statistiques bayésiennes au paragraphe 5.2 ;
- la pondération en utilisant des modèles semi-quantitatifs basés sur le jugement d'experts au paragraphe 5.3 ;
- la pondération à partir de modèles physiques et statistiques au paragraphe 5.4 ;
- la pondération à partir du modèle de Cox au paragraphe 5.5.

5.2 Les méthodes bayésiennes

5.2.1 Principes généraux de l'approche bayésienne

Les méthodes bayésiennes sont des méthodes statistiques permettant de quantifier les probabilités d'événements rares ou pour lesquelles on ne dispose que de peu de données issues du retour d'expérience.

Elles consistent à pondérer une loi de probabilité représentant les connaissances *a priori* ou personnelles grâce à une *inférence bayésienne* reposant sur le *théorème de Bayes* afin d'obtenir une représentation *a posteriori* ou corrigée.

L'approche bayésienne dépend à la fois de connaissances initiales dites *a priori* de l'analyste, d'experts, ou des connaissances d'un retour d'expérience passé qui vont être corrigées par l'acquisition de nouvelles informations. Ces nouvelles informations, appelées *fonction de vraisemblance*, sont combinées avec les connaissances *a priori* pour former le nouvel état des connaissances *a posteriori*.

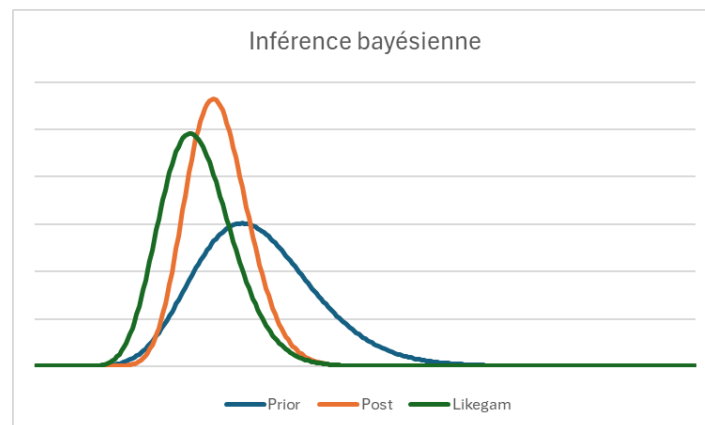


Figure 20 : Schémas de principe de la méthode bayésienne

A la différence des statistiques fréquentistes, on interprète les probabilités comme un degré de croyance plutôt que comme la fréquence limite d'un phénomène. Les estimations de la probabilité ne sont pas des estimateurs ponctuels (c'est-à-dire une valeur simple), mais des distributions de la densité de probabilité d'occurrence des événements, ce qui permet d'intégrer toute l'information disponible et les incertitudes associées à l'occurrence de ces événements.

5.2.2 Processus de mise en œuvre d'une approche bayésienne

Elle se compose des étapes suivantes :

1. Construction de la loi *a priori*.
2. Sélection des données et construction de la vraisemblance.
3. Combinaison des informations à l'aide du théorème de Bayes et génération de la distribution *a posteriori*.
4. Eventuellement, itération de la méthode.

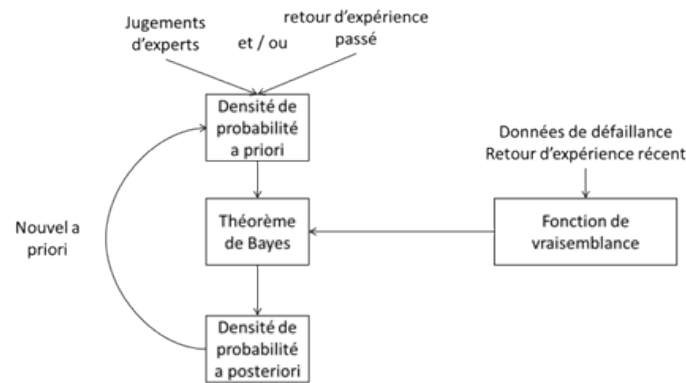


Figure 21 : Processus de mise en œuvre d'une approche bayésienne

5.2.2.1 Choix et construction des distributions

Pour choisir ou construire une loi de distribution adaptée, plusieurs considérations peuvent être faites. On choisira des distributions :

- qui simplifient le plus possible les calculs, notamment lorsque la densité a priori et la vraisemblance sont conjuguées ;
- a priori et a posteriori de même type afin de permettre un calcul itératif et de mettre à jour la distribution a posteriori si de nouvelles données sont disponibles ;
- a priori plus ou moins informatives selon la confiance que l'on a dans l'a priori ;
- paramétrables et dont les paramètres peuvent être interprétés physiquement.

5.2.2.1.1 Distribution a posteriori :

Pour ce faire, on cherchera d'abord à savoir si le taux de défaillance recherché est constant ou bien s'il varie avec le temps ou le nombre de sollicitations. S'il est constant, on pourra se tourner vers les lois utilisées pour modéliser des processus aléatoires comme la loi exponentielle pour les systèmes non soumis au vieillissement ou la loi binomiale pour les défaillances à la sollicitation. En revanche, lorsque les taux de défaillance sont variables, on utilisera par exemple les lois de Weibull, Gamma, ou bêta dont les paramètres suivront des lois normale, log-normale ou uniforme selon les informations a priori. Les lois de Weibull et log-normale sont souvent utilisées pour modéliser le vieillissement d'un système, mais requièrent l'utilisation d'un logiciel pour faire les calculs.

5.2.2.1.2 Distribution a priori :

La distribution a priori modélise la connaissance issue de données de retour d'expérience ou d'avis d'experts en estimant les différents paramètres de la loi comme la moyenne ou la variance.

Afin de construire la distribution à partir de données issues de bases ou de recueils, il est envisageable d'extrapoler l'usage prévu de ces données, à l'usage du système que l'on souhaite étudier. Il s'agira par exemple d'utiliser les valeurs moyennes ou les bornes des intervalles lorsqu'elles sont connues ou bien d'utiliser des données comme le nombre de survies ; le nombre de pannes ; les dates des pannes et connaissant le nombre de matériels observés pour en déduire une loi a priori. Les données issues de la littérature peuvent également être pondérées ou agrégées afin de construire une loi a priori plus adaptée.

Pour construire une distribution à partir du jugement d'experts, on cherchera à collecter leurs avis sur une valeur ponctuelle comme un taux de défaillance, une probabilité, ou bien sur la dispersion de ces valeurs au travers de la variance ou des bornes inférieure et supérieure d'un intervalle ou alors sur la forme de la distribution à retenir.

Il est envisageable de mettre en place un processus de collecte de l'avis de plusieurs experts afin de construire une loi a priori. Ces derniers, en fonction de leur degré de connaissance du système, chercheront également à estimer des grandeurs caractéristiques mentionnées précédemment.

Selon la confiance que l'on a dans l'avis de chaque expert on pourra utiliser la moyenne arithmétique pour ne favoriser (respectivement pénaliser) aucun avis ou alors utiliser la moyenne géométrique pour pondérer les avis des experts. On pourra également décider de retenir l'intervalle le plus grand en considérant la plus petite valeur comme borne inférieure et la plus grande valeur comme borne supérieure, ou bien de volontairement écarter des valeurs jugées extrêmes.

Plus d'information sur la prise en compte de l'avis d'experts sont disponibles au paragraphe 3.2.

Lorsque l'information initiale est peu précise, on choisira une distribution a priori peu informative, c'est-à-dire une loi dont la dispersion est importante qui permet de donner davantage de poids aux observations de la vraisemblance. Parmi les lois peu ou pas informatives, on trouve les lois uniformes bornées pour lesquelles tous les événements sont équiprobables et les lois de Jeffreys qui ne donnent aucun poids à l'a priori. Il est à noter que les lois uniformes nécessiteront l'utilisation d'un logiciel de calcul tandis que les lois de Jeffreys permettent facilement d'obtenir un résultat.

Parmi les lois plus informatives, il en existe de nombreuses qui peuvent être choisies judicieusement, notamment pour simplifier les calculs et pour correctement modéliser les événements.

- En l'absence de logiciel, on peut faire le choix de distributions normales qui simplifient les calculs ;
- Dans le cas d'un retour d'expérience représentant une probabilité de défaillance à la sollicitation (loi binomiale), la loi la plus intéressante est la loi bêta ;
- Dans le cas d'un retour d'expérience à taux de défaillance constant (non prise en compte du vieillissement) modélisé par la loi exponentielle, on préférera la loi Gamma.

Ces deux dernières lois présentent l'avantage d'être conjugables, c'est-à-dire que la combinaison de ces lois à d'autres de famille similaire donne une loi a posteriori dont les paramètres sont facilement calculables. Autrement, diverses lois peuvent être utilisées au moyen d'un logiciel de calcul dédié.

5.2.2.1.3 Informativité d'une distribution

La quantité d'information d'un retour d'expérience est proportionnelle au nombre d'observation. Concernant les distributions de probabilité, plus la distribution est concentrée autour de sa valeur moyenne (variance faible), plus elle est informative.

5.2.2.1.3.1 Information de Fischer

L'information de Fischer mesure la quantité d'information que les données observées x_i fournissent sur le paramètre θ d'une distribution. Elle est définie comme l'inverse de la variance de ce paramètre, soit :

$$I(\theta | x_i) = \frac{1}{V(\hat{\theta})} = E_{\theta=\hat{\theta}} \left[\left(\frac{\partial \ln \mathcal{L}(x_i | \theta)}{\partial \theta} \right)^2 \right]$$

avec

- θ : paramètre de la distribution que l'on cherche à estimer (exemple : taux de défaillance d'une loi exponentielle) ;
- x_i : observation de rang i prise dans l'échantillon d'observation (exemple : durée de vie mesurée du $i^{\text{ème}}$ composant ;
- $\hat{\theta}$: estimateur de θ à partir des données observées ;
- $V(\hat{\theta})$: variance de l'estimateur $\hat{\theta}$ qui indique à quel point l'estimateur est susceptible de varier d'un échantillon à l'autre ;
- $\mathcal{L}(x_i | \theta)$: fonction de vraisemblance qui exprime la probabilité d'observer x_i étant donné le paramètre θ . Dans la formule, la dérivée de la vraisemblance permet de mesurer la sensibilité de la vraisemblance aux changements du paramètre ;
- $E_{\theta=\hat{\theta}}$: espérance mathématique de l'expression entre crochets calculée en prenant l'estimateur $\hat{\theta}$ comme valeur du paramètre ;
- $I(\theta | x_i)$: quantité d'information que l'observation x_i donne sur le paramètre θ .

L'information de Fisher permet de quantifier la précision avec laquelle un paramètre inconnu θ peut être estimé à partir des données observées. Cela permet de déterminer la taille d'échantillon nécessaire pour atteindre une précision souhaitée ou de choisir entre différentes distributions en comparant l'information qu'elles apportent sur le paramètre.

L'information de Fisher est utilisée dans le choix de la distribution a priori par exemple en choisissant une distribution dont la variance correspond à l'incertitude exprimée par l'expert ou en déterminant des a priori informatifs ou non informatifs pour que l'estimation soit possible en fonction des données disponibles.

5.2.2.1.3.2 Lois de Jeffreys

Elles ont une densité invariante et sont obtenues par un changement de variable à partir d'une densité égale à la racine carrée de l'information de Fisher. Elles ont la particularité d'être des lois a priori non informatives et de pouvoir être conjuguées à d'autres lois usuellement utilisées, ce qui facilite les calculs.

Fonction de vraisemblance	Densité a priori de Jeffreys
Exponentielle : λ	$\frac{1}{\lambda}$
Poisson : λ	$\lambda^{-1/2}$
Binomiale : p, q	$p^{-1/2}(1-p)^{-1/2}$
Normale : μ, σ	$\frac{1}{\sigma}$

Tableau 9 : Fonctions de vraisemblance et densités a priori de Jeffreys associées

5.2.2.1.4 Distributions conjuguées

Les distributions conjuguées sont des distributions de la même famille mathématique. Elles présentent l'avantage de simplifier les calculs dans la mesure où les paramètres de la loi a posteriori s'obtiennent facilement à partir des paramètres de la loi a priori et de la vraisemblance. L'estimateur bayésien est également simple à calculer. Elles offrent également la possibilité de pondérer l'impact relatif de la fonction a priori et de la vraisemblance à volonté.

En revanche, lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser une loi a priori conjuguée à la vraisemblance, il sera judicieux d'utiliser un logiciel dédié au calcul. C'est notamment le cas lorsque l'on souhaite modéliser le vieillissement au travers de la loi de Weibull dont le paramètre varie avec le temps.

Lois des observations $f(x \theta)$ Vraisemblance	Paramètres des lois a priori usuelles $g_0(\theta)$	Paramètres des lois a posteriori $f_1(\theta x)$ x = observations	Estimateur bayésien a posteriori
Poisson, $P(\theta), x$	Gamma, $g(\alpha, \beta)$	Gamma, $g(\alpha + x, \beta + 1)$	$\frac{\alpha + x}{\beta + 1}$
Exponentielle, $f(k, t/\lambda)$	Gamma, $g(\alpha, \beta)$	Gamma, $g(\alpha + k, \beta + t)$	$\frac{\alpha + k}{\beta + t}$
Gamma, $g(k, t)$	Gamma, $g(\alpha, \beta)$	Gamma, $g(\alpha + k, \beta + t)$	$\frac{\alpha + k}{\beta + t}$
Binomiale, $bi(a, b, n)$	Bêta, $b(\alpha, \beta)$	Bêta, $b(\alpha + a, \beta + n - a)$	$\frac{\alpha + a}{\alpha + \beta + n}$
Bêta, $b(\alpha, x)$	Expo, $\exp(\lambda)$	Expo, $\exp(\lambda - \ln(1 - x))$	$\frac{1}{\lambda - \ln(1 - x)}$

Lois des observations $f(x \theta)$ Vraisemblance	Paramètres des lois a priori usuelles $g_0(\theta)$	Paramètres des lois a posteriori $f_1(\theta x)$ x = observations	Estimateur bayésien a posteriori
Normale, $N(\theta, \sigma^2)$ écart type connu	Normale, $N(\mu, r^2)$	Normale, $N(p(\sigma^2 \mu + r^2 \theta))$ Avec : $p^{-1} = \sigma^2 + r^2$	$\sigma_1 = \frac{[p\sigma^2 r^2]^{1/2}}{\sigma^2 + r^2}$ $\theta_1 = \frac{\mu\sigma^2 + r^2\theta}{\sigma^2 + r^2}$
Normale, $N(\mu, \frac{1}{\sigma^2})$ moyenne connue	Gamma, $g(\alpha, \beta)$	Gamma, $g(\alpha + 0,5; \beta + \frac{(\mu - x)^2}{2})$	$\frac{\alpha + 0,5}{\beta + \frac{(\mu - x)^2}{2}}$
Log Normale $LN(\mu', \sigma')$ σ' connue n observations $\mu' = \ln t$	Normale, $N(\mu, \sigma)$	Normale, $N(\mu'', \sigma'')$	$\mu'' = \frac{\mu'(\sigma'^2/n + \mu'\sigma^2)}{\sigma'^2/n + \sigma^2}$ $\sigma'' = \left[\frac{\sigma^2(\sigma'^2/n)}{\sigma^2 + (\sigma'^2/n)} \right]^{1/2}$

Tableau 10 : Principales lois conjuguées

5.2.2.1.5 Synthèse pour le choix des lois a priori et a posteriori

Comme explicité dans les paragraphes précédents, le choix des lois a priori et a posteriori est motivé par : le fait que les distributions soient conjuguées et que les calculs restent relativement simples, le caractère constant ou non des grandeurs de fiabilité à estimer, la quantité d'information contenue dans les lois ainsi que l'utilisation de paramètres physiquement explicables. On propose ici de rappeler quelques règles utiles aux choix des lois. A titre d'exemple, on peut donc utiliser :

- une loi Gamma conjuguée à une loi exponentielle pour évaluer un taux de défaillance constant. On évaluera sa dispersion à l'aide de la loi du Chi-deux ;
- une loi Beta conjuguée à une loi binomiale pour évaluer un taux de défaillance à la sollicitation constant. On évaluera sa dispersion à l'aide de la loi de Fischer ;
- une loi de Weibull à deux paramètres pour évaluer le rajeunissement ou le vieillissement des matériels, donc un taux de défaillance qui varie dans le temps ;
- une loi uniforme ou de Jeffreys pour modéliser une connaissance a priori vague de la part des experts ;
- une loi Gamma inverse pour modéliser l'expertise a priori sur des temps de défaillance qui peut être plus facile à estimer qu'un taux de défaillance.

5.2.2.2 Construction de la distribution a priori

La distribution a priori représente les connaissances ou croyances sur un paramètre avant d'observer les données. En continu, on utilise une densité de probabilité a priori.

L'expression générique de la densité a priori est $f(\theta)$, qui vérifie :

$$\forall \theta, f(\theta) \geq 0$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\theta) d\theta = 1$$

Cas n°1 : a priori de Jeffreys

Si l'on ne souhaite pas donner de poids aux informations a priori, on pourra utiliser l'a priori de Jeffreys. Par exemple, si les experts s'accordent pour définir qu'un taux de défaillance à une valeur de 3.10^{-5} , la forme de l'a priori sera : $f = \frac{1}{3.10^{-5}}$ pour la loi exponentielle.

Cas n°2 : construction d'une loi uniforme 1

Chaque expert i estime la valeur d'une probabilité de défaillance ou d'un taux de défaillance. On effectue donc une moyenne arithmétique ou une moyenne pondérée par expert pour obtenir la valeur à retenir p^* .

Afin d'obtenir une distribution uniforme à partir de cette moyenne, on borne la valeur de p_{min} à 0 et on calcule $p_{max} = 2 \times p^*$. On obtient donc une loi uniforme bornée par $p_{min} = 0$ et $p_{max} = 2p^*$.

Cas n°3 : construction d'une loi uniforme 2

Cette fois-ci, en plus d'estimer la valeur d'une probabilité ou d'un taux de défaillance, les experts estiment également les valeurs minimales et maximales envisageables.

On a : $p_{min} = \text{moyenne}\{p_{min,1}; p_{min,2}; \dots; p_{min,n}\}$ et $p_{max} = \text{moyenne}\{p_{max,1}; p_{max,2}; \dots; p_{max,n}\}$ et p^* la moyenne arithmétique des estimations des experts. Ce qui donne :

$$\begin{cases} f(p) = \frac{1}{p_{max} - p_{min}}, \text{ pour } p_{max} \leq p \leq p_{min} \\ f(p) = 0, \text{ ailleurs} \end{cases}$$

On rappelle que le calcul de la distribution a posteriori lorsque l'a priori est une loi uniforme bornée nécessitera l'utilisation d'un logiciel adapté.

Cas n°4 : construction d'une loi Gamma

Les méthodes pour construire une loi Gamma a priori diffèrent selon le type d'information que les experts sont en mesure de fournir. Ils peuvent estimer :

- Le nombre de défaillances constatées sur un matériel au cours d'un temps de mission défini. Le nombre de défaillances est assimilé au paramètre de forme de la loi et le temps d'utilisation au paramètre d'échelle. On note que l'informativité de la distribution dépend du temps d'observation choisi. Une analyse de sensibilité du temps de mission pourra être réalisée en complément pour vérifier l'impact sur le résultat final.
- L'espérance de la loi qui correspond à une durée de vie et son incertitude qui correspond à son écart type. Il sera alors possible de construire la loi Gamma correspondante à partir de la méthode des moments.
- Les bornes d'un intervalle de confiance sur la durée de vie du matériel qui permet ensuite de déterminer les paramètres de la loi a priori à partir d'une démarche itérative.

Une illustration de la construction de la loi Gamma à partir du jugement d'experts est présentée à l'annexe 6. Un raisonnement analogue peut être suivi afin de construire une loi a priori à partir de l'observation d'un retour d'expérience.

5.2.2.3 Sélection des données et construction de la vraisemblance

La vraisemblance correspond à la probabilité d'observer les données réelles pour un modèle connu. Autrement dit, elle exprime la probabilité des données observées en fonction des paramètres du modèle. Elle se calcule comme suivant :

Supposons un ensemble de données observées $D = x_1, x_2, \dots, x_n$ indépendantes et identiquement distribuées, alors la vraisemblance est le produit des probabilités individuelles de chaque observation sous le modèle paramétré par θ :

$$\mathcal{L}(\theta; D) = p(D | \theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i | \theta)$$

Avec $p(x_i | \theta)$ la densité de probabilité, soit la probabilité d'observer x_i pour une valeur donnée de θ .

Pour le modèle exponentiel, on a, pour $x_i \geq 0$:

$$\mathcal{L}(\lambda; D) = \prod_{i=1}^n \lambda e^{-\lambda x_i} = \lambda^n e^{-\lambda \sum_{i=1}^n x_i}$$

5.2.2.4 Combinaison des informations à l'aide du théorème de Bayes

Cas des événements discrets

$$\mathbb{P}(A_i | B) = \frac{\mathbb{P}(A_i) \times \mathbb{P}(B | A_i)}{\sum_j \mathbb{P}(A_j) \times \mathbb{P}(B | A_j)}$$

Où :

- $\mathbb{P}(A_i)$ est la *probabilité a priori* de l'événement A_i ;
- $\mathbb{P}(B | A_i)$ est la *vraisemblance*, c'est-à-dire la probabilité d'observer B si A_i est vrai ;
- $\sum_j \mathbb{P}(A_j) \times \mathbb{P}(B | A_j)$ est un *terme de normalisation* ou *probabilité marginale* de B qui représente, la probabilité totale d'observer B , en tenant compte de toutes les possibilités de A_j ;
- $\mathbb{P}(A_i | B)$ est la *probabilité a posteriori* de l'événement A_i .

Cas de variables continues

$$f_2(\theta | D) = \frac{f_0(\theta) \cdot \mathcal{L}(D | \theta)}{\int_{\Omega} f_0(\theta) \cdot \mathcal{L}(D | \theta) d\theta}$$

Où :

- $f_0(\theta)$ est la *densité de probabilité a priori* de θ ;
- $\mathcal{L}(D | \theta)$ est la *vraisemblance*, c'est-à-dire la probabilité d'observer les données D pour une valeur donnée de θ ;
- $\int_{\Omega} f_0(\theta) \cdot \mathcal{L}(D | \theta) d\theta$ est le *terme de normalisation* ou *vraisemblance marginale*, qui représente toutes les valeurs possibles de θ ;
- $f_2(\theta | D)$ est la *densité de probabilité a posteriori* pour le paramètre θ .

Calcul de l'estimateur ponctuel de la loi a posteriori

L'estimateur ponctuel de la distribution a posteriori est l'espérance de la densité de probabilité a posteriori. Soit pour un taux de défaillance λ ,

$$E[\lambda] = \int_{\lambda} \lambda f_2(\lambda | x_i) d\lambda$$

Calcul de l'intervalle de crédibilité

Dans le cadre de la démarche fréquentiste, l'*intervalle de confiance* de l'estimateur est constitué de bornes aléatoires. A l'inverse les bornes de l'*intervalle de crédibilité* de la méthode bayésienne sont fixes et sont exprimés comme suivant pour un intervalle symétrique d'une variable aléatoire λ avec taux de confiance $1 - \alpha$.

$$\int_0^{\lambda_{inf}} f_2(\lambda | x_i) d\lambda = \frac{\alpha}{2}$$

$$\int_{\lambda_{sup}}^{\infty} f_2(\lambda | x_i) d\lambda = \frac{\alpha}{2}$$

Si, dans certains cas les calculs sont compliqués à résoudre sans logiciel adapté, on peut utiliser l'approximation du Chi deux pour l'intervalle de crédibilité d'un taux de défaillance et la loi de Fischer pour déterminer l'intervalle de crédibilité d'une probabilité de défaillance à la sollicitation.

Une application numérique illustrative est proposée en annexe 8.

5.2.2.5 Base de données basée sur l'inférence bayésienne

Dans les paragraphes précédents, on a vu un exemple de l'utilisation des statistiques bayésiennes afin de déterminer la valeur d'un taux ou d'une probabilité de défaillance grâce à la combinaison d'avis d'experts avec un retour d'expérience (cf. annexe 8).

L'inférence bayésienne peut également servir à corriger ou bien rendre plus spécifique des données issues d'une base de données génériques. C'est par exemple ce qui est fait par le laboratoire SANDIA dans le cadre du développement de l'outil HyRAM+.

Le rapport *Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards*, rédigé par Sandia National Laboratories (Sandia, 2009) pour le compte du Département de l'Energie des Etats-Unis d'Amérique, présente une méthodologie d'évaluation quantitative du risque afin d'aider à l'élaboration de la réglementation liée à l'hydrogène. Pour ce faire, une évaluation des fréquences de pertes de confinement de plusieurs équipements liés spécifiquement à l'hydrogène (compresseurs, réservoirs, filtres, brides, flexibles, tuyauteries, joints, vannes...) est réalisée. Le rapport a été publié en 2009.

Par la suite, le laboratoire Sandia a développé, distribue et maintient le logiciel HyRAM+ construit pour faciliter la quantification des scénarios d'accidents, la prédiction les effets physiques, ainsi que la caractérisation des dangers (effets thermiques des incendies de réacteurs, effets de surpression dus à l'allumage différé). Pour ce faire, le logiciel reprend les données de quantification obtenues par le laboratoire Sandia. C'est dans le cadre de la mise à jour du logiciel que Sandia revoit régulièrement les fréquences de pertes de confinement des équipements associés. Au moment de la rédaction du rapport, la dernière version est la 5.1 et date de décembre 2023 (Brian et al., 2023).

Les fréquences de pertes de confinement sont obtenues par l'utilisation d'un modèle bayésien. La mise en place du modèle s'effectue en plusieurs étapes :

1. **Définition d'un modèle mathématique qui relie la fréquence d'une fuite à son diamètre.**
Le diamètre de la fuite est donc, avec le diamètre de l'équipement le seul paramètre retenu caractérisant la fréquence de fuite. Le modèle assume que la fréquence de fuite moyenne est corrélée linéairement au logarithme de la fraction d'aire de fuite du composant.
2. **Définition d'une fréquence a priori.** Les données de différentes bases ont été collectées, leur moyenne et écart type ont été calculés afin de déterminer une loi de probabilité de répartition des fréquences de fuite. Cette analyse sert d'entrée au modèle bayésien et permet de fixer les paramètres a priori de la formule mathématique de l'étape 1. Les bases de données utilisées sont hétérogènes et non propre à l'hydrogène. L'ensemble des bases de données agrégées pour déterminer la distribution a priori est listée dans le rapport de Sandia (Sandia, 2009). On y trouve des bases de données de différents secteurs (nucléaire, canalisation de gaz, chimie et pétrochimie).
3. **Définition de la vraisemblance.** La vraisemblance a été construite à partir de données issues du retour d'expérience. Des données spécifiques à l'hydrogène ont été collectées par les membres du NFPA 2 TG6 de la Compressed Gas Association. Il est fait mention dans le rapport de l'entreprise Air Products and Chemicals, Inc. qui aurait fourni des données essentielles à la réalisation de l'étude. Toutefois, ces données sont confidentielles et n'ont pu être étudiées par l'Ineris.
4. **L'inférence bayésienne pour déterminer les fréquences de fuites des composants** à partir des fréquences génériques a priori et des données du retour d'expérience a ensuite été mise en œuvre. Les fréquences sont calculées pour différentes tailles de brèches correspondant à des intervalles de fraction d'aire de fuite allant de 0,01% de l'aire de fuite maximale à 100% de l'aire de fuite maximale (i.e. le diamètre interne de l'équipement).

5.3 Pondération par un modèle semi-quantitatif basé sur le jugement d'experts

La pondération des probabilités par le jugement d'experts consiste à identifier les facteurs qui influencent la probabilité, puis à les pondérer au moyen de coefficients déterminés sur la base d'avis d'experts que l'on aura collectés au préalable afin de les adapter au contexte du système étudié.

5.3.1 Principes de mise en œuvre de la démarche

L'approche par pondération des événements initiateurs consiste à identifier l'ensemble des différentes causes à l'origine des événements redoutés du système étudié. Puis, connaissant la fréquence d'occurrence de chacune de ces causes, il s'agit de les corriger à l'aide de facteurs de pondération pour les adapter à la configuration étudiée. Ces facteurs de pondération sont déterminés à partir des facteurs d'influence et donc prennent en compte les différences liées au fonctionnement du système, à l'environnement, au design, à la maintenance, etc., mais aussi les barrières de sécurité qui réduisent la probabilité d'occurrence.

Certains documents de référence⁸ présentent les causes à l'origine des événements redoutés et leur répartition (en % et fréquence). En revanche, si cette répartition n'est pas disponible, il faudra l'établir au préalable via le jugement d'experts.

La méthode de pondération par les causes consistera donc à définir un modèle générique avec une répartition des causes initiales. Ce modèle sera ensuite exploité pour chaque étude spécifique en estimant :

- dans quelles mesures le système étudié est exposé à chaque cause spécifique ;
- l'influence des barrières de sécurité permettant de limiter la probabilité de propagation d'une cause.

Les résultats de ces analyses peuvent être représentés sous forme de tableau ou sous forme arborescente, qui correspond alors à la partie amont (gauche) d'un nœud papillon qu'on assimile de manière simplifiée à un arbre de défaillance.

5.3.2 Pondération des causes par le jugement d'experts

En fonction des données disponibles et de l'avis d'experts, on cherche à évaluer le poids de chaque cause retenue comme étant à l'origine de l'événement redouté. Il s'agit donc d'évaluer, pour chaque cause issue de la répartition de la base de données, si elle est plus probable ou moins probable dans le contexte de l'étude. Dans le but d'encadrer la cotation, on peut définir une fréquence minimale et une fréquence maximale de l'ERC qu'on ne pourra pas dépasser. Il s'agit ici d'éviter les résultats trop extrêmes liés à des erreurs majeures sur une mauvaise compréhension du système par les experts.

Ensuite, on réalise l'étape de cotation qui peut intégrer plusieurs dimensions :

- **La valorisation de barrières de sécurité sur le système étudié.** On calcule la probabilité de défaillance de la barrière ou on estime leur facteur de décote (par exemple sur le modèle d'un niveau de confiance). On intègre ensuite ce résultat comme un facteur de décote de la fréquence des causes sur lesquelles elles s'appliquent.
- **La valorisation de mesure d'exclusion de la cause.** On identifie les mesures ou les justifications d'exclusion de l'occurrence des causes.
- **La valorisation d'un facteur de décote paramétrique.** Pour réaliser cette étape, on peut définir une échelle de pondération commune à l'ensemble des événements initiateurs. Cela permet d'harmoniser la pondération entre toutes les causes et de faciliter l'étape de pondération puisqu'il est plus facile pour les experts de quantifier les facteurs de décote relativement les uns par rapport aux autres. Par exemple, on pourra retenir une échelle de pondération formulée ainsi :
 - la cause ne s'applique pas au système étudié ;
 - on estime que la cause est beaucoup plus probable sur les installations à l'origine des sources de données que sur le système étudié ;

⁸ Taylor Associates ApS, Hazardous Materials Release and Accident Frequencies for Process Plant Volume II, Process Unit Release Frequencies, Version 1 Issue 7, September 2006

- la cause est plus probable ou légèrement plus probable sur les installations à l'origine des sources de données que sur le système étudié ;
- il n'y a pas de différence notable ;
- on estime que la cause est plus probable pour le système étudié ;
- la cause est beaucoup plus susceptible de se produire sur le système étudié que dans le contexte industriel à l'origine de l'obtention des données de la base ou du recueil utilisé.

Cette échelle devra être ensuite quantifiée lors de la concertation entre les différents experts en fonction du cas d'application.

5.4 Pondération au moyen de modèles basés sur la physique et statistiques

Des modèles mathématiques et physiques permettent d'évaluer le poids de l'occurrence d'une cause selon la valeur de plusieurs paramètres influents. Le principe repose sur la connaissance et la paramétrisation d'équations modélisant une cause ou un nombre de causes restreint à l'origine de la défaillance d'un système. Ces modèles font intervenir des paramètres intrinsèquement liés au système comme : sa taille, les matériaux utilisés, etc., des paramètres liés au fonctionnement, à l'environnement, aux conditions de maintenance, etc. Ils peuvent ensuite être utilisés directement pour pondérer la valeur d'une fréquence, un taux de défaillance ou une durée de vie.

Plusieurs référentiels couramment utilisés en sûreté de fonctionnement ont été développés dans ce sens pour quantifier les défaillances de systèmes électriques, électroniques, mais aussi mécaniques (cf. paragraphe 5.4).

Également, des travaux ont été menés afin de développer des modèles mathématiques permettant de pondérer une densité de probabilité.

Il est à noter que plusieurs de ces modèles correspondent aux modèles Standards de Vie Accélérée (SVA) présentés au chapitre sur les essais accélérés. Plus d'information est disponible sur ces modèles à l'annexe 6.

Nous proposons d'illustrer ces modèles à l'aide de trois sources appliquées à des contextes d'utilisation différents : la source de données FIDES pour les composants électriques ou électroniques, la source de données NSWC pour les composants mécaniques et une note pour un cas d'application dans le nucléaire.

5.4.1 Illustration pour les composants électriques ou électroniques : base de données FIDES

La base de données FIDES (UTE, 2010), développée par un groupement d'entreprises françaises du secteur de l'aéronautique et de la défense, traite particulièrement des composants d'automatismes. Elle s'applique par exemple aux résistances, aux diodes, aux condensateurs, aux circuits intégrés, aux processeurs, etc.

Ce guide propose de pondérer le taux de défaillance générique d'un composant en tenant compte des contraintes physiques telles que : thermique, électrique, cyclage thermique, mécanique, humidité, chimique. A cette fin, des modèles de vie accélérée (du même ordre que ceux présentés dans le paragraphe 3.3.3.4) sont utilisés afin de définir des coefficients multiplicatifs selon les conditions d'utilisation. On trouve notamment :

- la loi d'Arrhenius pour modéliser les contraintes thermiques et thermoélectriques ;
- le modèle de Norris-Landzberg pour modéliser le cyclage thermique et thermomécanique ;
- le modèle de Peck pour modéliser l'humidité ;
- la loi de Basquin pour modéliser les vibrations ;
- un modèle semi-quantitatif pour modéliser la contrainte chimique.

A noter que la méthode propose également de pondérer le taux de défaillance générique selon la qualité et la maîtrise des techniques de développement, de fabrication et d'utilisation du produit en utilisant des modèles semi-quantitatif.

5.4.2 Illustration pour les composants mécaniques : base de données NSWC

Le rapport *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment* rédigé par le *Naval Surface Warfare Center* des Etats-Unis en 2010 (NSWC, 2010), propose des méthodes de pondération de taux de défaillances de composants mécaniques, tels que les joints d'étanchéité, pompes, filtres, moteurs, vannes, compresseurs, etc.

Des modèles physiques complexes sont utilisés pour déterminer la valeur de chaque coefficient multiplicatif en fonction d'un nombre important de paramètres tels que la température, la pression, les dimensions, les propriétés des fluides et des matériaux, etc. L'objectif est là aussi d'adapter des taux de défaillance de base aux caractéristiques du système étudié et de son environnement et cela sans a priori sur les relations physiques qui lient les facteurs d'influence aux taux de défaillance.

5.4.3 Application dans le secteur nucléaire

D'autres travaux, tel que le rapport *Failure Rate Estimates for Passive Mechanical Components* rédigé par L. C. Cadwallader (Cadwallader, 2018) pour le compte du Laboratoire National de l'Idaho propose une méthode de correction des taux de défaillance de composants mécaniques passifs dédiés à la fission nucléaire pour les adapter à la fusion. Ces travaux sont basés sur une analyse qualitative des causes de défaillance et sur leur modélisation à l'aide de modèle physiques et statistiques. Sont notamment utilisés :

- le modèle de Basquin pour modéliser la vibration (défini à partir de FIDES) ;
- la prise en compte de la radiation via un modèle spécifique ;
- la prise en compte de l'épaisseur de la tuyauterie où le facteur de pondération est défini comme suivant : $\frac{P_2}{P_1} = \frac{[L_2 \cdot D_2 / e_2^2]}{[L_1 \cdot D_1 / e_1^2]}$ (P_i , la probabilité de fuite de la tuyauterie i , e_i son épaisseur, D_i son diamètre et L_i sa longueur).

5.5 Pondération par un modèle statistique global : le modèle de Cox

Dans leurs travaux de recherche (Brissaud et al., 2007), Florent Brissaud et Brice Lanternier ont proposé une modélisation des taux de défaillance qui combine une densité de probabilité de Weibull, afin de modéliser le vieillissement des composants mécaniques, avec un modèle de Cox, afin de tenir compte de différents facteurs influant l'occurrence de la défaillance.

Le modèle semi-paramétrique proposé est de la forme :

$$\lambda(t, Z) = \lambda_0(t) \times g(Z)$$

Avec,

- $\lambda(t, Z)$ le taux de défaillance du système fonction du temps t et de l'état Z des facteurs d'influence ;
- $\lambda_0(t)$ le taux de défaillance de base du système, uniquement fonction du temps ;
- $g(Z)$ une fonction, appelée fonction d'influence, qui dépend de l'état des facteurs d'influence.

$\lambda_0(t)$ est donc défini à partir de la densité de probabilité de Weibull à deux paramètres :

$$\lambda_0(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

Dans la mesure où des facteurs de différentes natures peuvent être considérés, le vecteur Z pourra être composé de variables binaires, discrètes ou continues. La forme retenue est la suivante :

$$g(Z) = e^{B \cdot Z} = e^{\sum_{k=1}^m b_k \times z_k}$$

Avec :

- m le nombre de facteurs d'influence modèle ;
- $B = [b_1, ..., b_m]$ le vecteur des coefficients du modèle de Cox ;
- $Z = [z_1, ..., z_m]$ le vecteur des états des facteurs d'influence.

La détermination des paramètres du vecteur $B = [b_1, ..., b_m]$ se fait à l'aide du maximum de vraisemblance dont la méthode et le calcul ne seront pas détaillés ici. Nous invitons le lecteur à consulter l'article pour plus de détails.

Le modèle de Cox est un modèle de régression qui permet d'estimer l'effet de plusieurs variables explicatives sur le taux de risque (ici le taux de défaillance) de cet événement. Il s'agit d'un modèle à risque proportionnel, c'est-à-dire que le rapport de la fonction de risque de 2 systèmes, qui ne diffèrent que par une seule covariable, est indépendant du temps. Le risque de panne du système 1 est proportionnel au risque de panne du système 2.

Si l'on prend la covariable k égale à 1 pour le système 2 et égale à 0 pour le système 1, on a :

$$\frac{\lambda(t, Z_2)}{\lambda(t, Z_1)} = e^{b_k}$$

De manière plus générale, on peut écrire :

$$\frac{\lambda(t, Z_2)}{\lambda(t, Z_1)} = e^{B \cdot (Z_2 - Z_1)}$$

L'utilisation du modèle de Cox nécessite de :

- recueillir les données d'entrée : temps de bon fonctionnement avant défaillance, états des facteurs d'influence associés ;
- établir un code pour les différents facteurs d'influence : pour les valeurs quantitatives on reprendra ces valeurs ; pour les valeurs qualitatives on définit une échelle ou des intervalles ;
- déterminer les paramètres de la fonction d'influence ;
- déterminer les paramètres du taux de défaillance de base ;
- combiner et synthétiser les résultats.

5.6 Processus de mise en œuvre d'une approche de pondération des probabilités

Les étapes de mise en œuvre d'une démarche de pondération sont les suivantes :

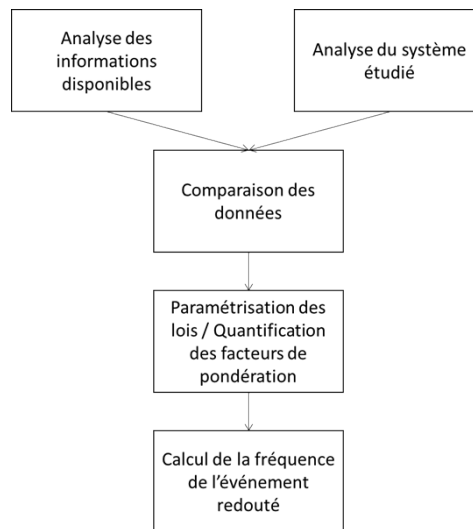


Figure 22 : Schéma du processus de la méthode de quantification par pondération des causes

1. **Analyse des informations issues de recueils ou de bases de données.** L'objectif de cette première étape est de recueillir les informations disponibles. Premièrement, on cherchera à caractériser qualitativement la source de données. Il s'agit donc d'identifier :
 - **la qualité de la source de données.** C'est-à-dire chercher à savoir qui est à l'origine de la source, qui la maintient, comment les données ont été obtenues, si la source est reconnue comme étant fiable...
 - **le type de données qu'elle contient.** C'est-à-dire la nature des données, s'il s'agit de taux de défaillance ou de fréquences ainsi que leurs répartitions par causes, s'il s'agit de données spécifiques à un secteur d'activité ou à une industrie ou bien s'il s'agit de données plus génériques. Ensuite, on veillera à décrire précisément les installations à l'origine des données : les standards de conception, le procédé ou les paramètres de fonctionnement du système (pression, température, tension, intensité...), l'environnement d'exploitation, le profil de vie (cycle, lot, continu), le plan de maintenance... Finalement, on cherchera à identifier les éventuelles barrières de sécurité mises en œuvre. L'objectif de cette étape est de pouvoir souligner les différents facteurs d'influence des fréquences ou taux de défaillance.
2. **Analyse de l'installation ou du système étudié et de sa fiabilité.** Lors de cette étape, on cherchera à décrire le plus précisément possible le fonctionnement du système ou de l'installation étudiée. Les informations pourront couvrir entre-autre : les standards de conception, le procédé ou les paramètres de fonctionnement du système (pression, température, tension, intensité...), l'environnement d'exploitation (température, humidité...), le profil de vie (cycle, lot, continu), le plan de maintenance... On cherchera également à identifier les éventuelles barrières de sécurité mises en œuvre, les bonnes pratiques et facteurs de décotes éventuels. Ensuite, il convient d'identifier les facteurs d'influence, les causes de défaillances et événements initiateurs à l'origine des ERC. Cela se fait généralement au travers d'une analyse de risques (analyse préliminaire des risques – APR, analyses des modes de défaillances de leurs effets et leurs causes – AMDEC, arbres de défaillances – AdD...).
3. **Comparaison qualitative des données recueillies aux étapes 1 et 2.** A partir des descriptions précédentes et des analyses de risques réalisées, l'analyse comparative permet d'identifier les écarts entre les systèmes à l'origine des bases de données et le système objet de l'étude. On pourra

utiliser un tableau afin de tracer l'ensemble des justifications. De manière non exhaustive on pourra comparer :

- le contexte d'utilisation : s'il s'agit de systèmes fixes ou mobiles, de l'industrie des procédés, de machines... ;
- le fonctionnement des systèmes : leur cycle d'exploitation, les paramètres de fonctionnement (pression, température, intensité, tension, charge...) ;
- la description de l'environnement : température, humidité, atmosphère corrosive (e.g. milieu salin), rayonnement, perturbation électromagnétiques... ;
- les matériaux, standards de conception : standards liés aux choix des matériaux et à leur dimensionnement, aux classes d'étanchéité, à la tenue aux contraintes du procédé ou de l'environnement... ;
- les plans d'inspections et de maintenance : fréquence et nature des interventions ;
- les barrières valorisées dans les bases de données et celles présentes sur le système étudié.

En pratique, il est à noter que la plupart des bases de données génériques sont malheureusement peu détaillées et qu'il est parfois nécessaire de faire des hypothèses.

Ensuite, on comparera la liste des facteurs d'influence et des causes (en cas de pondération des causes) proposées par la base de données avec celle identifiées lors de l'évaluation des risques du système. Il s'agit de faire apparaître les éventuelles causes qui pourraient venir à manquer et celles qui sont superflues. Dans le cas de causes manquantes pour lesquelles il n'y aurait pas de données disponibles dans les bases, le travail de pondération devra être complété d'une autre méthode de quantification (e.g. jugements d'experts, essais en milieu contraint).

4. **Cotation des poids associé à chaque facteur d'influence.** En fonction des données disponibles, on cherche ici à évaluer le poids associé à chaque facteur d'influence retenu. Les méthodes de quantification sont détaillées aux paragraphes suivants :

- 5.2 Les méthodes bayésiennes
- 5.3 Pondération par un modèle semi-quantitatif basé sur le jugement d'experts
- 5.4 Pondération au moyen de modèles basés sur la physique et statistiques
- 5.5 Pondération par un modèle statistique global : le modèle de Cox

5. **Mise en forme des données et calcul de la métrique de fiabilité.** Finalement, suivant la méthode mise en œuvre pour obtenir le poids de chaque facteur d'influence, on effectue le calcul de pondération comme présenté aux paragraphes ci-dessus. A partir du résultat obtenu, il peut être nécessaire de calculer un estimateur de la fiabilité (taux de défaillance moyen, fréquence moyenne de défaillance, borne supérieure de l'intervalle de confiance...) suivant ce que l'analyse de risques requiert.

5.7 Caractéristiques des méthodes de pondération de la probabilité

Méthodes	Avantages	Limites et contraintes	Quand l'utiliser	Quand l'éviter
Méthodes bayésiennes	Permet d'obtenir des résultats robustes mathématiquement avec peu de données de retour d'expérience. Elle facilite la mise à jour de la distribution en présence de nouvelles données collectées. Cela est d'autant plus facile si les distributions a priori et la vraisemblance sont conjuguées. Plus il y a de données collectées, moins l'a priori a d'impact dans l'obtention du résultat et plus la vraisemblance compte. De ce fait, au fur et à mesure de la collecte de nouveau retour d'expérience, les résultats des démarches fréquentistes et bayésienne convergent. L'intervalle de crédibilité représente un intervalle dans lequel le paramètre inconnu à une probabilité $1-\alpha$ de se trouver, compte tenu des données observées et de la distribution a posteriori. Il est donc probabiliste et ses bornes sont fixes contrairement à l'intervalle de confiance. Il est facilement interprétable : un intervalle de crédibilité à 90% signifie qu'il y a une probabilité de 90% que le paramètre inconnu se trouve dans cet intervalle. Quel que soit le type d'essais (type I ou type II) et plus généralement quel que soit le type de plan d'échantillonnage, les résultats obtenus avec la démarche bayésienne conduiront à la détermination d'un même estimateur, ce qui n'est pas le cas avec la démarche fréquentiste. La démarche fréquentiste atteint ses limites lorsque les données sont censurées à droite, c'est-à-dire que l'ensemble des matériels sont survivants en fin d'observation. Pour autant, cela ne signifie pas qu'un matériel aura une durée de vie infinie ou autrement dit que sa fréquence de défaillance est nulle. L'approche bayésienne présente l'intérêt de mieux traiter le cas « 0 défaillance » que la démarche fréquentiste.	En l'absence d'un retour d'expérience suffisant, la loi a priori va avoir un impact non négligeable sur le résultat. Par conséquent, le choix d'une loi a priori adaptée à la configuration étudiée est un enjeu non négligeable à la bonne application de la démarche bayésienne. Le paragraphe 5.2.2.1 donne des informations pour guider l'utilisateur lors de cette étape. Dans certains cas, le calcul de la distribution a posteriori requière des calculs complexes difficilement solvables en l'absence d'un logiciel dédié. C'est particulièrement le cas lorsque les variables dépendent du temps ou que la loi a priori et la vraisemblance ne sont pas conjuguées.	Lorsque l'on ne dispose que de peu de données issues du retour d'expérience ou d'essais de fiabilité.	Lorsqu'il y a trop peu d'informations pour définir la loi a priori.
Pondération par un modèle semi-quantitatif	Méthode flexible qui permet de modéliser des configurations très différentes avec peu de données disponibles.	Méthode qui repose uniquement sur le jugement d'expert et qui est donc subjective et difficilement justifiable. Ils nécessitent des experts une bonne connaissance des systèmes et des mécanismes de dégradation. Lors de la pondération des EI, les experts doivent disposer de la répartition des causes en fréquence.	Lorsque l'on ne dispose pas de données objectives pour la modélisation et que les experts peuvent raisonner par analogies ou extrapolation et faire des estimations fiables.	Lorsqu'il est difficile pour les experts de raisonner par analogie ou pas extrapolation, notamment s'il s'agit d'une technologie avec aucun système existant comparable.
Pondération par des modèles basés sur la physique et les statistiques : FIDES, NSWC, ...	Ils sont basés sur des lois et modèles physiques qui permettent une représentation précise rigoureuse. Ils fournissent des prédictions souvent robustes et donc les résultats sont transparents et justifiables Présentent l'avantage d'adapter une fréquence générique sans avoir à décrire précisément le mécanisme physique de dégradation.	Il est nécessaire de disposer de modèles décrivant les mécanismes de détérioration ainsi que des données permettant de les paramétrer (essais, littérature, REX).	Lorsque l'on dispose de données de base à pondérer et de modèles représentant la détérioration des systèmes. Lorsque l'on dispose de données permettant de paramétrer les modèles (description du procédé et de l'environnement).	Lorsque ne dispose pas des données permettant de paramétrer les modèles ou que les modèles ne décrivent pas tous les modes de détérioration des systèmes.
Pondération par le modèle de Cox	Permet d'intégrer des causes de défaillance variées (binaires, qualitatives, quantitatives) qui ne dépendent pas forcément du temps. Des métriques représentant la confiance peuvent être calculées.	Toutes les covariables pertinentes doivent être incluses au modèle. Il n'y a pas de directives claires sur le choix d'estimation des paramètres. La multi-colinéarité, la monotonie, les grandes valeurs de covariables peuvent empêcher l'estimation d'un paramètre du modèle.	Les durées jusqu'à défaillances sont indépendantes et distribuées de manières identique.	Les défaillances ne se sont pas produites précédemment n'ont pas de données de covariables associées.

Méthodes	Avantages	Limites et contraintes	Quand l'utiliser	Quand l'éviter
		La sélection des paramètres est souvent manuelle et chronophage. Les équations de régression de Cox traditionnelles supposent que les covariables décrivent un processus stationnaire. Des données historiques doivent être disponibles pour paramétrer le modèle. Ne peut être utilisé que pour développer des modèles de défaillance qui ont été expérimentés précédemment et pour lesquelles des données de covariables associées sont disponibles. Un modèle statistiquement adéquat mais physiquement insensé peut être développé trop facilement.	Les covariables ont un effet multiplicateur sur le taux de défaillance de référence. Un certain nombre de covariables est disponible et nécessaire pour décrire le changement de défaillance. Les données de covariables associées sont disponibles pour les modes de défaillance à modéliser ;	Le taux de défaillance n'est pas multiplicatif. Les défaillances ne peuvent pas être séparées en modes de défaillance individuels. Les covariables associées aux modes de défaillance ne peuvent pas être mesurées.

Tableau 11 : Caractéristiques des méthodes de pondération de la probabilité

6 Evaluation des risques pour le suivi des équipements

Ce chapitre présente les principales méthodes d'évaluation et de gestion des risques liés au suivi des équipements. Dans un premier temps, les méthodes usuelles appliquées aux technologies matures sont détaillées en distinguant les structures et les composants passifs d'une part, des composants actifs d'autre part. Ensuite, des réflexions sont proposées afin de questionner et de proposer des éléments de réponses aux difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre de méthodes de suivis des technologies émergentes ainsi que l'articulation entre les méthodes de suivi des équipements et les études de sécurité.

6.1 Méthodes de gestion des risques de vieillissement de technologies matures

Ce chapitre décrit les méthodes existantes concernant la gestion du suivi et du maintien des composants des structures ou des équipements critiques dans le temps. Ces méthodes ont pour objectif de déterminer la fréquence et le contenu des étapes de suivi et maintien des structures subissant un vieillissement physique (gestion optimisée de l'inspection et de la maintenance). Elles permettent de prioriser les actions entre les différents équipements / structures à étudier et influence in fine la probabilité de défaillance des structures et équipements.

Les deux contraintes principales des méthodes de suivi des structures sont :

- **La réduction des risques humains et environnementaux** : les composants importants pour la sécurité et la disponibilité doivent faire l'objet d'un maintien fonctionnel dans le temps. Les dégradations qui peuvent survenir doivent être contrôlées et corrigées avec un objectif de réduction maximale du risque.
- **L'optimisation des coûts (minimisation des pertes de production, du coût d'entretien, de réparation et de remplacement)** : le suivi et la maintenance d'un composant ne doivent pas pénaliser sa rentabilité. Il est important d'éviter la défaillance coûteuse tout en optimisant le coût des actions de surveillance et de maintenance.

Par conséquent, la prévision du vieillissement des installations est une nécessité. Cette anticipation permet d'évaluer la cinétique, la fréquence ou encore les conséquences associées aux différentes dégradations afin de prioriser les actions dans un objectif de réduction du risque et des coûts.

De nombreuses méthodes différentes existent (SAMCO, 2006) pour traiter les infrastructures / équipements passifs les plus critiques dans l'industrie, les transports et la gestion du patrimoine. L'état de l'art sur les méthodes existantes dans différents secteurs industriels a permis de classer celles-ci au travers de trois familles principales (non-étanches entre elles) (IMdR, 2014) :

- **Méthodes basées sur le classement**, dans lesquelles l'évaluation se fait par des scores d'inspection et d'expertise, alloués à chaque composant. Ces scores permettent l'évaluation des indicateurs de l'état de santé de la structure et de ses composants, aboutissant à une cotation générale de la structure et à une priorisation des actions à mener. Cette approche est déterministe et qualitative. Elle nécessite principalement des données d'observation simples et permet de traiter, des structures importantes en termes de taille et de nombre de composants, avec des efforts raisonnables. Toutefois, ces méthodes ne peuvent être appliquées qu'aux scénarios dont la gravité des conséquences est faible ou moyenne.
- **Méthodes basées sur la criticité**, dans lesquelles les conséquences et la probabilité de défaillance sont obtenues par des approches génériques et des référentiels spécifiques au secteur industriel ; elles sont donc difficilement extrapolables d'un secteur à un autre. Les phénomènes de dégradation et la fiabilité des inspections sont pris en compte pour l'évaluation de la criticité, pour le calcul de la durée de vie résiduelle et pour la planification des interventions. Ces méthodes sont semi-probabilistes, impliquant des approches qualitatives, quantitatives ou semi-quantitatives. Elles nécessitent l'existence d'une base de données importante sur les taux de défaillances et la connaissance des paramètres d'environnement pouvant influencer l'évolution de l'état des structures. La qualité des données et l'effort d'évaluation sont des paramètres déterminants pour le choix des approches qualitatives et quantitatives à prendre en compte dans l'application pratique de cette méthode.

- **Méthodes basées sur la fiabilité mécanique**, dans lesquelles l'analyse fine de la fiabilité structurale vis-à-vis de chacun des modes de défaillance est effectuée pour l'état actuel et prévisionnel ; la dégradation aléatoire doit être considérée dans le cadre d'une modélisation mécanique du vieillissement de la structure. L'évaluation du coût du cycle de vie permet l'optimisation du plan d'inspection et de maintenance, sous des contraintes de budget et de fiabilité. Ces méthodes sont purement probabilistes et quantitatives. Elles nécessitent de nombreuses données statistiques sur les matériaux et sur l'état de la structure ainsi que des modèles de comportement précis. Elles sont adaptées aux structures relativement simples, mais à hauts risques, dans lesquelles les scénarios sont interdépendants. L'analyse de la décision permet d'aboutir à une optimisation effective de la gestion de la sécurité et du plan d'investissement à court et à long termes.

Pour chacune de ces catégories, on rencontre des méthodes quantitatives et qualitatives. Une présentation globale des grands principes de ces méthodes est donnée ci-dessous.

Le paragraphe 7.2.5 présente ensuite les spécificités des approches pour les composants actifs.

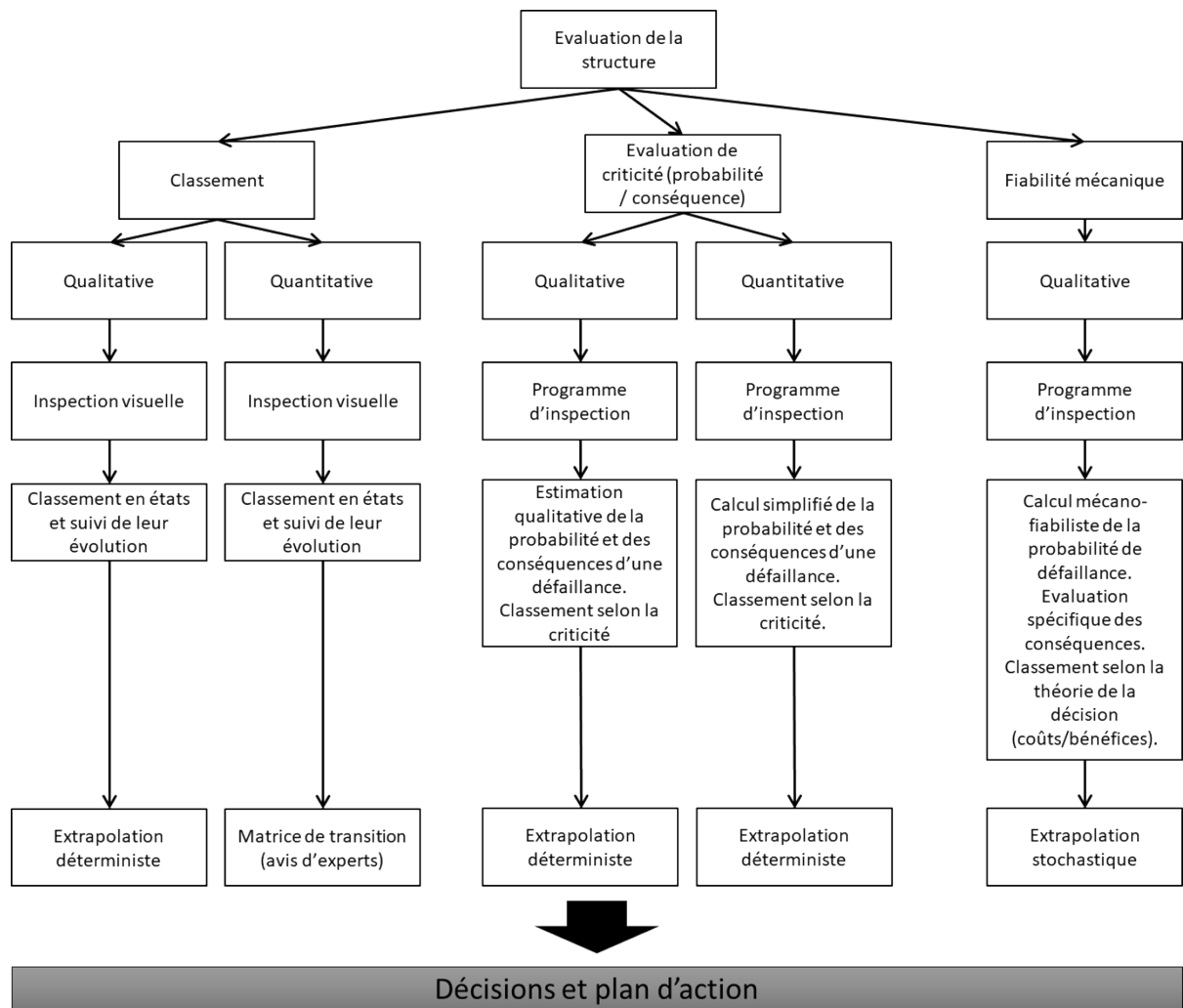


Figure 23 : Schéma de la catégorisation simplifiée des méthodes de suivi (IMdR, 2014).

Il est important de noter que cette classification des méthodes est une vision simplifiée de l'existant basée sur l'approche théorique générale des méthodes et en particulier sur l'approche choisie pour l'évaluation de la condition d'état, l'évaluation des risques et la prise de décision. Ces catégories ne sont pas étanches entre elles et certaines méthodes pratiques rencontrées dans l'industrie et la gestion d'ouvrage ont une approche mixte.

Le tableau ci-dessous présente de façon non exhaustive l'utilisation des méthodes par secteur et les organismes moteurs du développement de ces méthodes.

Méthode	Secteurs industriels utilisant la méthode	Secteurs intéressés par la méthode	Organismes moteurs
Classement	Génie civil, transport terrestre Pétrochimie	Pipelines	AASHTO, SETRA, HYDRO QUEBEC, France chimie (ex. UIC), HSE
Criticité	Pétrochimie, Nucléaire, Hydraulique, Electricité (transport)	Gestionnaires d'ouvrages Génie Civil Equipements industriels	API, EEMUA, HSE, EDF, ASME
Fiabilité	Industrie mécanique Base normative du génie Civil (Eurocodes)	Aviation Nucléaire Ouvrages Génie Civil	JCSS, BS, EDF

Tableau 12 : Exemples de secteurs connus pour l'utilisation des différentes méthodes et organismes moteurs autour de ces méthodes (IMdR, 2014)

6.2 Méthodologie de l'organisation de l'inspection et de la maintenance

Le suivi des équipements et des structures consiste à déterminer les actions nécessaires au maintien en état de fonctionnement des installations. Pour cela, il est nécessaire de connaître l'état de dégradation au travers d'actions d'inspection et d'intervenir avant ou lors de la défaillance au travers d'actions de maintenance.

Parmi les différentes méthodes d'optimisation des actions de suivi, on retrouve comme précisé dans le paragraphe précédent des méthodes basées sur le classement (jugement d'experts), sur la criticité (évaluation de risque) et les méthodes basées sur la fiabilité mécanique (évaluation mécano-fiabiliste) et les méthodes de gestion des équipements actifs. Les différentes approches sont détaillées ci-dessous.

6.2.1 Méthodologies basées sur le classement

Les méthodologies basées sur le classement (système de notation) sont appliquées pour des structures de grandes dimensions ou avec de nombreux composants. Par exemple, les structures de génie civil dans l'industrie, les ouvrages d'art dans les transports, les petits barrages...

L'application des méthodes de classement, en se basant sur des référentiels qualitatifs ou quantitatifs, constitue une démarche simple pour l'évaluation de l'état général de la structure, à travers l'observation de son niveau de dégradation. Elles sont mise en place dans le cadre d'une politique de management multi- objectifs : cible de taux d'accidents, moyen techniques existants, budget donné.

Principe :

Les méthodologies basées sur le classement se basent sur une évaluation de la condition des structures selon des inspections qualitatives (visuelles) et des jugements d'expert. L'inspection apporte une connaissance sur l'état actuel de la structure et le jugement d'experts qualifie la criticité des dégradations et de leurs évolutions. Les modélisations sont rares ou inexistantes, un classement basé sur l'inspection et l'expertise permet d'attribuer une criticité à chaque composant de la structure.

L'agrégation et la classification des composants ou structures permet de hiérarchiser les composants ou structures sur lesquels agir en priorité sans déterminer la fréquence ou le niveau d'action nécessaire.

La méthode est composée des étapes qui sont décrites ci-dessous (cf. Figure 24).

1. Décomposition de la structure en unités structurales, sous-systèmes (appelés composants) et éléments. Chaque niveau est défini par la somme non hiérarchisée des éléments qui le constituent. Toutefois, cette décomposition ne tient pas compte des liens logiques, fonctionnels et mécaniques entre les éléments, à l'exception de la notion de « protection » entre les éléments (par exemple, la « peinture anticorrosion » est un élément protecteur de l'élément « poutre métallique »).
2. Etablissement d'un référentiel pour les éléments, dans lequel les différents types sont répertoriés, avec leurs quantités dans le système (i.e. nombre, surface, volume, etc.), et modes (mécanismes) de dégradation potentielle ; chaque gestionnaire a la liberté de rajouter des types d'éléments supplémentaires et/ou de nouveaux modes (mécanismes) de dégradation.
3. Etablissement d'un référentiel de conditions d'état pour chacun des modes de dégradation ; les indications qualitatives ou quantitatives permettent aux inspecteurs d'associer facilement et de façon relativement invariante des quantités ou des pourcentages pour chaque condition d'état. Dans cette vision, la nocivité est considérée uniformément distribuée sur l'élément, ce qui peut bien se justifier pour les éléments dont la performance dépend du comportement global, sans notion de zones critiques. A titre d'exemple, la surface dégradée d'une chaussée, ou celle corrodée d'une tôle d'acier, détermine le pourcentage de dégradation de l'élément structural, quelle que soit la répartition de cette dégradation.
4. Etablissement d'un référentiel des « indicateurs intelligents » pour couvrir les modes (mécanismes) de dégradation qui dépendent d'un comportement local, tel que la fatigue. Ces modes (mécanismes) ne sont pas couverts par l'approche macroscopique du référentiel de conditions d'état. Ces indicateurs déclenchent des alertes pour la hiérarchisation des actions.

5. Les règles d'agrégation des conditions d'état sont définies par la dégradation ayant le score le plus élevé. Cette approche admet la même pondération pour tous les modes (mécanismes) de dégradation, et seules les quantités affectées déterminent la condition d'état de l'élément ; il est clair que cette hypothèse est difficilement admissible pour les éléments structuraux dont certains modes (mécanismes) sont plus nocifs que d'autres, même si leur étendue est faible.
6. L'évaluation de la structure se base sur le calcul d'un certain nombre d'indicateurs (indices de santé, indice de classement, indice de suffisance, etc.) à partir des conditions d'état de chaque type de dégradation dans chaque élément de la structure, d'une part, et des autres paramètres socio-économiques, d'autre part. Certains indices sont calibrés par des approches empiriques issues du retour d'expérience ou par expertise.
7. Le pronostic des conditions d'état est évalué soit par élicitation des avis d'experts, soit par le retour d'expérience relatif aux dernières inspections de la structure. Un référentiel permet généralement d'ajuster l'évaluation de la cinétique de dégradation.
8. La perte en valeur structurale et la hiérarchisation des actions sont décidées en fonction des indices structuraux et des paramètres économiques associés (coût de défaillance, de réparation, de rénovation ou de remplacement).

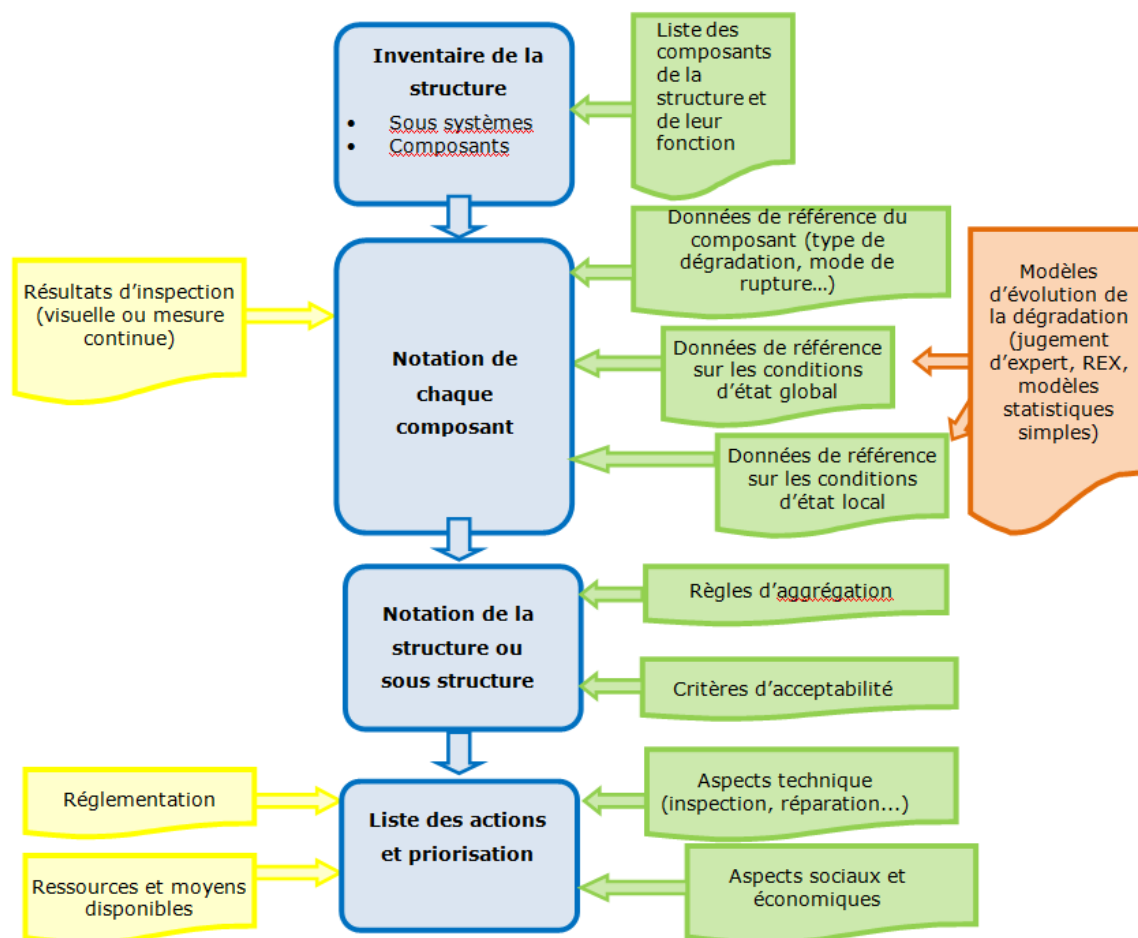


Figure 24 : Schéma de la méthodologie basée sur le classement (IMdR, 2014).

Le HSE remarque que la plus simple des méthodes de classement est basée sur deux indicateurs :

- l'un basé sur l'aptitude de la structure à assurer sa fonction actuelle ;
- l'autre, sur la possible évolution des dégradations dans le futur.

En pratique, il existe de nombreux niveaux à ces méthodes, des plus basiques au plus complexes pour lesquels de nombreux indicateurs sont développés. Quelques exemples peuvent être trouvés dans les références suivantes (SETRA, 2006), (NHI, 2012), (ASSHTO, 2010) et (Hydro-quebec, 2005).

La consistance des méthodes est néanmoins toujours assurée par un référentiel professionnel ou des experts.

Les méthodes de classement sont des méthodes principalement déterministes et généralement qualitatives ou semi-quantitatives. Les données minimales nécessaires sont :

- un inventaire complet des composants de la structure et de leur fonction ;
- un contrôle a minima visuel de l'état actuel des différents composants ;
- des guides de référence d'experts ou des avis d'experts sur la capacité évolutive des dégradations rencontrées ;
- des critères d'acceptabilité qualitatifs des défauts.

Avantages et limites :

Les avantages de ce type de méthodologie sont :

- méthodologie simple basée sur l'expérience ;
- données déterministes limitées ; Cela implique un traitement simple sans analyse de l'environnement ou du comportement mécanique de la structure ;
- la classification dépend de l'état observé ;
- le classement déterministe est synonyme de prise de décision simplifiée.

Les limites de ces méthodologies sont :

- les agrégations entre composants ne sont pas toujours rigoureuses ou physiques ;
- les événements rares sont peu cernés dans ces approches ;
- l'évaluation de l'état d'une structure peut être subjectif par ces méthodes, cela est cependant réduit par l'utilisation de guides professionnels ;
- les incertitudes ne sont pas explicitement considérées mais couvertes par une approche conservatrice ;
- il n'y a pas d'évaluation détaillée de la probabilité ou de la conséquence permettant d'influencer la prise de décision ;
- il est difficile d'optimiser les coûts en se basant sur ces méthodologies ;
- la décision n'étant pas basée sur des critères précis de conséquence ou de fréquence, elle est difficilement explicable au public.

En conclusions, ces méthodes semblent pertinentes pour de large structure avec de nombreux composants à risque limité et dans un objectif d'approche global de la planification d'actions d'inspection et de maintenance ou pour des composants peu critiques. Elles permettent de gérer le suivi des structures par une approche standardisée simple de mise en œuvre intégrant le retour d'expérience.

6.2.2 Méthodes basées sur la criticité

L'objectif de ces méthodes est de planifier le suivi et la maintenance d'un équipement en focalisant les actions sur les équipements les plus à risques. Un plan d'inspection est ainsi défini pour une industrie ou une large structure selon un critère admissible de risque.

Dans ces méthodes, les probabilités et conséquences des défaillances sont évaluées. Généralement, ces approches sont standardisées par industrie et par équipement. L'évaluation du risque intègre les données statistiques, la qualité d'inspection et une évaluation précise des durées de vie. Elle requiert cependant de nombreuses données pour qualifier l'influence des différents facteurs (process, humains, environnement...) sur la durée de vie d'un équipement.

Ainsi, ces méthodes sont principalement utilisées dans l'industrie de l'énergie et de la chimie de façon quantitative (RBI – Risk-Based Inspection). Elles sont également utilisées de façon qualitative chez les gestionnaires d'ouvrages de génie civil et dans le transport d'énergie électrique. Enfin, elles sont utilisées de façon quantitative pour certains équipements dans l'industrie nucléaire, notamment aux Etats-Unis.

Principe :

Cette méthode consiste à réaliser l'évaluation des risques des équipements et installations, d'une part, et à exploiter les résultats d'inspection pour définir les fréquences et la qualité des inspections, d'autre part.

Cette méthode, dans ses versions les plus avancées, est capable de préciser :

- le classement par la criticité (couple probabilité / conséquence de la défaillance) de tous les équipements évalués ;
- la description détaillée du plan d'inspection à employer pour chacun des équipements, en spécifiant :
 - o les méthodes d'inspection à utiliser ;
 - o l'étendue des inspections ;
 - o les instants et intervalles d'inspection ;
- la gestion du risque selon le plan de maintenance ;
- la description des mesures de réduction des risques liés au vieillissement, telles que les réparations, les remplacements et les instruments de sécurité ;
- les niveaux de risque attendus pour les différents équipements considérés, après inspection et après la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (i.e. mitigation).

Les différentes étapes générales de ces approches sont les suivantes :

1. La première étape est la **sélection des équipements** à intégrer aux méthodes. Cette sélection s'appuie sur le retour d'expérience et le jugement d'experts. Un groupement par type d'élément ou par type de dégradation / défaut peut être réalisé pour l'analyse. Cette étape est similaire à une analyse préliminaire des risques (cadre des EDD), elle peut être complétée par les obligations de suivi réglementaire.
2. Pour chaque composant, des **modes de dégradation et scénarios de défaillance** sont déterminés sur la base de standards, du retour d'expérience et du jugement d'experts. Des méthodes plus détaillées peuvent également être utilisées ;
3. Quelle que soit la méthode utilisée, l'étape suivante est la **détermination** pour chaque événement redouté (par mode de défaillance de l'équipement ou agrégée) d'une criticité établie à partir de l'évaluation **de la probabilité d'occurrence de la défaillance et de la gravité des conséquences**. Ces évaluations sont basées sur des données génériques modifiées par la connaissance des inspections / maintenances préalables (tenant compte de la probabilité de détection du défaut recherché pour la technique d'inspection utilisée) et d'un ensemble de facteurs influant le comportement dans le temps des équipements et la maîtrise des risques dans l'industrie.
4. La criticité potentielle est déterminée par la combinaison de la probabilité d'occurrence et de la gravité. **L'évaluation de risques** peut être menée par équipement ou par partie d'équipement homogène (par exemple, pour un ensemble de tuyauterie dans une même boucle d'iso-dégradation, ou sur un équipement sur chaque partie contenant des phases et/ou des substances similaires). Les défaillances potentielles et avérées sont ensuite placées dans une grille de criticité et comparées aux niveaux acceptables fixés par les standards ou l'industriel.
5. En parallèle, **le niveau d'endommagement** selon le mode de dégradation étudié est évalué. Cette évaluation est réalisée sur la base d'inspection ou de données génériques de dégradation. Elle peut être basée sur des formules mécaniques simples de cinétique ou de durée de vie résiduelle, proches des formulations de dimensionnement des équipements / structures ou plus complexe. Le résultat de cette évaluation peut également être un avis expert ou une comparaison de l'état réel par rapport à l'état attendu (standardisation des résultats de contrôles).
6. En fonction du risque (criticité) obtenu et du calcul de la durée de vie, on détermine des **plans d'inspection** contenant la durée maximale avant la prochaine inspection et la qualité minimale (types de contrôles, localisation, nombre d'échantillons...) d'inspection nécessaire. En fin de vie, des méthodes particulières de suivi en service (Fitness For Service) ou des travaux sont prévus.

7. Une étape d'**optimisation** basée sur la liste des actions à réaliser et les contraintes techniques, économiques et réglementaires est ensuite réalisée. Cette étape est plutôt optionnelle et n'est pas réalisée pour toutes les méthodes.

L'ensemble du processus est répété et optimisé après chaque inspection.

Pour chacune des étapes de la méthode, différentes approches sont possibles, elles sont brièvement discutées ci-après. A noter que les catégories décrites ci-dessous ne sont pas étanches et certaines pratiques appliquent ces approches selon le type de dégradation, les données disponibles et l'effort disponible pour la programmation de l'inspection.

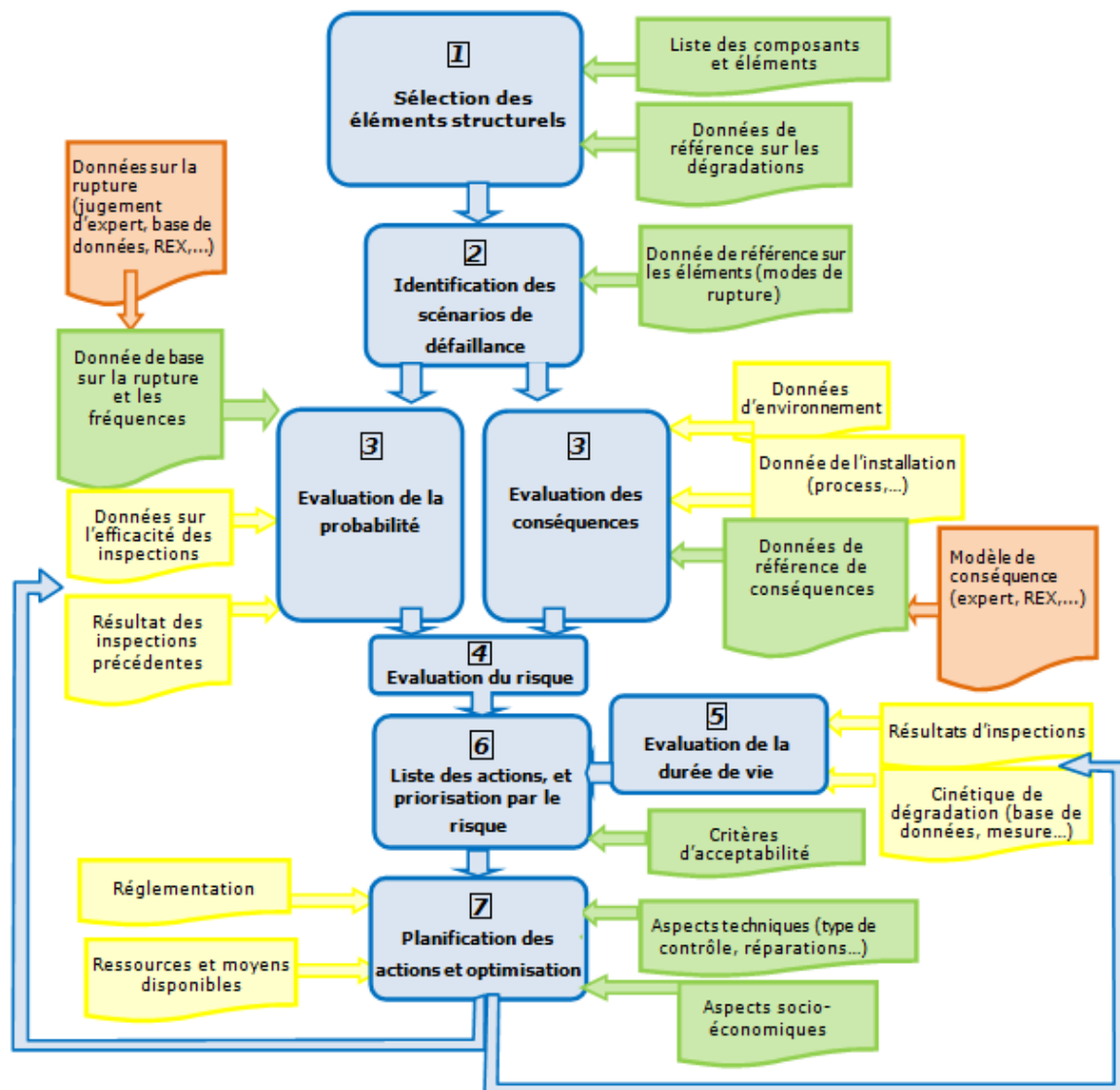


Figure 25 : Schéma de la méthode basée sur la criticité (IMdR, 2014)

Approche simplifiée

L'analyse simplifiée du risque consiste en une évaluation du profil de risque des composants et systèmes sur la base des estimations qualitatives du dommage global et des conséquences associées. Dans cette approche, il est nécessaire de définir, de façon arbitraire, des règles qualitatives pour indiquer le niveau du risque en fonction du couple (probabilité, conséquences). Ces méthodes se rapprochent des méthodes de sûreté de fonctionnement de type AMDE(C).

Evaluation semi-quantitative des risques

L'évaluation semi-quantitative des risques est utile pour définir une démarche structurée pour le classement des risques selon leur probabilité, leur impact et leur criticité, d'une part, et pour classer les actions de réduction des risques selon leur niveau d'efficacité, d'autre part. Dans cette approche, une échelle de pondération est attribuée aux différents niveaux de risque, avec une hiérarchisation logique et explicite.

Les méthodes semi-quantitatives sont utilisées pour définir une échelle relative du risque.

Dans cette approche, les probabilités peuvent être basées sur des valeurs statistiques de défaillance, puis pondérer selon des facteurs d'influence par des approches de type bayésiennes (cf. paragraphe 5.2). Des échelles sont attribuées aux différents scénarios et conséquences, sans faire appel à des techniques mathématiques pour l'évaluation des probabilités et sans avoir besoin de données statistiques notables. L'objectif est de hiérarchiser les risques, sans tenir compte de leurs interactions, dans le but de définir l'ordre dans lequel ces risques doivent être traités.

Cette approche a l'avantage de permettre l'évaluation d'un spectre plus large de risques que celui de l'approche quantitative, puisqu'elle n'exige pas de modèle mathématique complet. Les résultats d'une approche totalement quantitative peuvent être introduits dans l'approche semi-quantitative, au prix d'une perte de précision due à la discrétisation par catégorie requise dans cette méthode.

Approche quantifiée de la durée de vie résiduelle

Cette approche est similaire à celle de l'approche semi-quantitative, mais avec des techniques de quantification et de chiffrage très variées, qui peuvent être plus ou moins compliquées. En fait, l'approche est dite « quantitative » lorsque des démarches spécifiques sont élaborées pour la quantification de la probabilité de défaillance, des conséquences ou de la durée de vie résiduelle.

La probabilité de la défaillance est estimée par des méthodes de type bayésienne (cf. paragraphe 5.2) intégrant les facteurs principaux de la défaillance. A noter que la dégradation réelle de la structure n'intervient pas dans cette probabilité. La conséquence est estimée par des approches quantitatives plus ou moins précises afin de permettre l'évaluation du risque. Enfin, on s'appuie généralement sur la matrice de criticité pour situer le risque.

Les mesures de dégradation issues des inspections antérieures permettent l'estimation quantitative de la durée de vie résiduelle (cf. chapitre 4). Le calcul du facteur de confiance par rapport à l'évaluation du risque, d'une part, et à la méthode d'inspection employée, d'autre part, permet de spécifier l'intervalle d'inspection à partir de la durée de vie résiduelle. Les valeurs du risque et l'intervalle d'inspection sont exploités pour mettre en place des mesures de réduction des risques et des moyens de planification des inspections.

La hiérarchisation des risques peut se faire sur la base des probabilités, des conséquences ou de la criticité (i.e. le risque lui-même). Ce classement peut tenir compte des coûts, des bénéfices, du système de management de la sécurité, des aspects politiques et médiatiques, et de la valeur de l'entreprise.

Cette approche consiste donc à réaliser l'évaluation des risques des équipements d'une part, et à exploiter les résultats d'inspection pour définir les fréquences et la qualité des inspections, d'autre part. Selon les méthodes, ces deux aspects peuvent être fortement liés ou dissociés.

Des approches similaires existent pour la maintenance, comme la maintenance centrée sur la fiabilité (RCM) qui est utilisée dans un grand nombre d'industries. Cette approche peut être mise en œuvre à n'importe quel stade du cycle de vie d'un projet (conception, phase de développement, exploitation...). La RCM est une méthodologie basée sur le risque qui permet d'identifier les politiques de maintenance à mettre en œuvre pour gérer les défaillances. Elle prend en compte le mécanisme de dégradation responsable de la défaillance.

- **L'identification des risques** consiste à identifier les fonctions et les événements susceptibles d'entraîner une perte de ces fonctions. Les tâches de maintenance

susceptibles d'empêcher la perte des fonctions ou de réduire leurs effets sont identifiées. Les conséquences peuvent être d'ordre sécuritaire (personnel et/ou environnement) ou économique (perte de production par exemple).

- **L'analyse des risques** consiste à estimer la fréquence de chaque défaillance avec ou sans maintenance. Les conséquences sont établies en définissant les effets des défaillances. Une matrice des risques combinant la fréquence des défaillances et les conséquences permet d'établir des catégories de niveaux de risque.
- **L'évaluation des risques** est ensuite réalisée en sélectionnant la politique de gestion des défaillances appropriée pour chaque mode de défaillance. Le RCM nécessite une bonne connaissance de l'équipement et de la structure, ainsi que des modes de défaillance des différents composants.

Les étapes de base d'un programme RCM sont les suivantes :

- initiation et planification (identification des données disponibles, des compétences et des besoins de formation, des contextes d'exploitation) ;
- analyse des défaillances fonctionnelles (définition des fonctions, de leurs défaillances et de leurs modes de défaillance, de leurs effets et de leurs risques) ; une AMDEC apporte un soutien structurel à cette étape ;
- sélection des tâches (évaluation des conséquences, choix des tâches de maintenance, définition des intervalles entre les actions) ;
- mise en œuvre (identification détaillée des tâches de maintenance et rationalisation de la périodicité des tâches, évaluation des conséquences du vieillissement) ;
- amélioration continue (contrôle de l'efficacité de la maintenance, contrôle de la réalisation des objectifs attendus (sécurité, économie et exploitation), évaluation de l'effet du vieillissement).

Le RCM, comme le RBI, nécessite des moyens assez importants. Pour plus de détails, on peut consulter la IEC 60300-3-11, *Gestion de la fiabilité – Partie 3-11 : Guide d'application – Maintenance centrée sur la fiabilité* ou la pré-norme RBI (NF EN 16991).

Besoins, avantages et limites :

L'approche basée sur la criticité nécessite a minima :

- un inventaire complet des composants de la structure et de leur fonction ;
- une organisation structurée du management du suivi des équipements et structures ;
- beaucoup de données statistiques et de connaissances liées aux modes de dégradation – fréquences génériques de défaillance et cinétiques de dégradation ;
- des critères d'acceptabilité quantitatifs des défauts ;
- des guides de références par secteur d'activité et par équipement pour l'application de l'analyse de risque.

Les avantages de ce type d'approche sont :

- la possibilité d'utiliser des approches qualitatives ou quantitatives en fonction du contexte ;
- une évaluation de la probabilité et de la conséquence des scénarios critiques permettant une connaissance de la criticité des équipements et des éléments d'aide à la décision ;
- l'intégration des résultats d'inspection dans l'évaluation du risque permet une optimisation des choix de qualité et fréquence d'inspection en fonction du risque ;
- la méthode permet de concentrer les efforts d'inspection sur les éléments les plus à risque ;
- pas ou peu de besoin de modélisation fine des systèmes ;
- l'évaluation de probabilité et de conséquence d'une défaillance permet une bonne communication autour des méthodes ;
- les éléments techniques ou organisationnels de gestion du risque peuvent être introduits dans la méthode de façon qualitative ou quantitative.

Les limites de cette approche sont :

- un besoin évident de personnel qualifié pour collecter et analyser les nombreuses données. Ce personnel doit combiner une bonne connaissance du fonctionnement de l'équipement,

- des méthodes d'analyse de risques et des méthodes de mitigation (inspection, maintenance, limites des conditions opératoires...) ;
- difficultés d'adapter la méthode sans une base de données industrielle très importante et sans retour d'expérience. La standardisation étant propre à chaque domaine industriel d'utilisation ;
- le calcul du risque dans ces méthodes n'est pas toujours rigoureux car souvent semi-quantitatif ;
- l'évaluation des durées de vie est réalisée par typologie de dégradation. La combinaison des risques de plusieurs dégradations est rarement évaluée physiquement et pourtant source de plusieurs accidents ;
- l'absence de modèles physiques fins des structures implique une impossibilité d'étendre les durées de vie (basées sur des formules de conception) au-delà des limites conservatives du modèle ;
- les incertitudes ne sont pas explicitement considérées mais intégrées par introduction de fréquences génériques de défaillance et facteurs de sécurité sur le calcul de probabilité de défaillance et de durée de vie ;
- le retour d'expérience nécessaire est important, pour construire les codes qui régissent la méthode, notamment pour déterminer les données statistiques de base des évaluations de probabilité ;
- les événements rares ou combinés, n'offrant que très peu ou pas de données, sont négligés par ces méthodes.

Les méthodes basées sur le risque offrent un cadre cohérent pour l'évaluation de la sécurité des structures et pour l'élaboration de plan d'inspection des installations. Une évaluation empirique de la probabilité de défaillance et des conséquences permet de classer l'équipement dans la matrice de criticité (ces évaluations sont propres à des systèmes et des conditions bien spécifiques).

Elles ont l'avantage d'avoir une formulation codifiée, permettant leur application sans pré-requis important et sans modélisation préalable du système étudié (pas de modèle physique à construire). L'approche qualitative décrit de façon globale la procédure à suivre pour la gestion des risques. La matrice de criticité est employée avec des interprétations plutôt qualitatives des différents niveaux de probabilité et de conséquences.

Alors que l'approche est assez bien cadrée pour le calcul des probabilités et des conséquences, elle demeure limitée par l'absence de modèle physique fin. Elle est donc réservée aux éléments critiques peu dégradés et ne permet pas une optimisation complète des coûts de l'inspection.

Plusieurs exemples de méthodes peuvent être trouvées dans les références suivantes (ASME, 1991), (API 580, 2016) et (API 581, 2016), (EEMUA, 2018), (HSE, 2012), (IAEA, 2009).

6.2.3 Méthodes basées sur la fiabilité mécanique

Ces méthodes sont basées sur une modélisation mécano-fiabiliste rigoureuse : le comportement de la structure représentée est mécanique et probabiliste, c'est-à-dire que les modèles de comportement déterministe sont couplés à des modèles probabilistes des données d'entrée (Lannoy, 2018).

Cette modélisation est complétée par une analyse des conséquences de la rupture et des coûts pour la formulation d'une fonction de l'utilité. Cette approche fournit ainsi le cadre le plus sophistiqué de représentation du système, de son fonctionnement et de son environnement.

Ces méthodes sont notamment utilisées dans le domaine de l'industrie mécanique, du nucléaire, du génie civil et de l'industrie pour les composants ou parties de composant les plus critiques. Le niveau de développement, d'utilisation et d'acceptation de ces méthodes est cependant très variable.

Principe :

Dans cette méthode complète, après l'identification du système structural à étudier, l'arbre d'événements des conséquences de la défaillance est construit et ensuite quantifié, sur la base de l'analyse du comportement du système et de l'identification des conditions opérationnelles. L'arbre d'événement permet également l'évaluation des conséquences au niveau du système et de son

environnement. Par ailleurs, l'identification des aléas et la description logique du système permettent la réalisation des arbres de défaillance et son évaluation quantitative en s'appuyant sur l'analyse du retour d'expérience. Les évaluations quantitatives des probabilités basées sur des modèles R-C (cf. paragraphe 4.3.6) permettent le calcul de la distribution de la durée de vie résiduelle en fonction de l'arbre des défaillances et de calculs mécano-fiabilistes, et sont ensuite combinées au calcul des conséquences dans l'arbre d'événements pour conduire à l'évaluation des risques.

En fonction des informations disponibles sur la durée de vie résiduelle, les calculs des conséquences et les risques associés, l'analyse de la décision est effectuée pour proposer un schéma de planification des interventions et des mesures de réduction des risques. L'impact de ces opérations sur la durée de vie résiduelle est réévalué afin d'améliorer la qualité du plan d'actions mis en place. La décision se base préférentiellement sur l'optimisation coûts-bénéfices, sous contraintes de niveau de fiabilité et de risque admissible.

Cette méthode est purement quantitative et implique l'utilisation de modèles probabilistes, physiques et mécaniques pour la dégradation et pour la prise en compte des interdépendances fonctionnelles (cf. paragraphe 4.3.6). Les données sur la structure, l'environnement et les inspections sont traitées pour la définition des distributions de probabilité qui sont utilisées en entrée des modèles de calcul. Néanmoins, les informations qualitatives peuvent être intégrées par l'utilisation d'approches bayésiennes (cf. paragraphe 5.2) permettant d'ajuster les informations quantitatives.

Le risque est évalué quantitativement (probabilité de défaillance physique et modèle fin de conséquence), sans référentiel particulier pour la comparaison ; cette dernière peut être réalisée sur la base d'une équivalence monétaire.

Pour les structures existantes, il est peut-être défini différents niveaux de fiabilité « acceptables », comme, par exemple : un niveau en dessous duquel il est nécessaire d'entreprendre des travaux de réparation et un niveau en dessous duquel la structure ne peut plus être exploitée.

Pour établir ces deux niveaux, il est nécessaire de tenir compte des arguments économiques et de la sécurité des personnes. Les structures existantes ont généralement une durée de vie de re-conception plus petite que les structures nouvelles, ce qui peut être utilisé comme argument pour réduire leur niveau de fiabilité admissible. Par ailleurs, le coût de mise à niveau d'une structure existante est souvent plus élevé que celui des nouvelles constructions.

A ce jour, ces méthodes sont peu appliquées à grande échelle, seulement dans de rares industries à faible acceptabilité de risque (nucléaire, transport aérien...). Elles servent à la fois à fiabiliser des équipements non détériorés et dans certains cas à la justification du maintien en service d'un équipement ayant dépassé la durée de vie initialement calculée par calcul d'une probabilité de défaillance mécanique admissible. Plus rarement, l'évaluation quantitative du risque est utilisée pour optimiser les plans d'inspection et de maintenance. Néanmoins, ces méthodes correspondent aux développements les plus aboutis pour le suivi de composants ou d'équipements critiques et de nombreux industriels s'y intéressent. Elles peuvent, moyennant des modèles physiques pertinents, être source d'identification des facteurs d'importance dans le suivi des équipements.

Besoins, avantages et limites :

Les besoins de ce type de méthode sont très nombreux. En particulier, on compte :

- une description précise de l'état, des fonctions et des relations fonctionnelles de chaque composant ;
- une modélisation fine des dégradations et des données statistiques ;
- des modèles détaillés de comportement des structures ou composants dégradés ;
- des modèles aléatoires des données présentant des incertitudes ;
- des méthodes numériques de propagation des incertitudes (Monte-Carlo, méthodes FORM-SORM...) ;
- des modèles de coût complet (inspection, maintenance, indisponibilité, remplacement...).

Les avantages des méthodes basées sur la fiabilité mécanique sont :

- les méthodes sont transversales et peuvent être appliquées dans tout type d'industrie ;
- calcul complet de la probabilité de défaillance physique assurant un lien direct entre état de la structure et probabilité utilisée dans le cadre de l'analyse de risques ;
- possibilité d'intégrer des modèles de comportement complexe intégrant les incertitudes ;

- prise en compte quantitative des incertitudes liées aux structures, aux inspections et aux modèles ;
- possibilité de réaliser des études de sensibilité et de caractériser quantitativement les variables utiles à la prise de décision (modèle complet de coût / bénéfice / risque) ;
- possibilité de prendre en compte les événements rares ou combinés ;
- possibilité d'optimisation complète du processus.

Les limites de ces méthodes sont :

- difficultés à appliquer la méthode sans une base de données industrielle très importante et sans retour d'expérience ;
- méthode complexe à mettre en œuvre nécessitant une quantité importante de ressources techniques et humaines ;
- nécessité d'un très haut niveau d'expertise pour la mise en œuvre, l'analyse et l'interprétation des données des méthodes de fiabilité en mécanique ;
- données nécessaires difficile à obtenir, notamment concernant les incertitudes sur les données. Les données statistiques pouvant être faibles ou inexistantes ;
- ses calculs peuvent devenir impossibles (limites théoriques ou techniques) pour des modèles trop complexes ;
- faible standardisation de ces approches rendant plus difficile l'accès aux méthodes ;
- communication complexe due à la complexité de la méthode.

Ces méthodes constituent une approche intégrée et quantitative permettant de classer les scénarios de défaillance de structure, au moyen d'un traitement et d'une considération explicites des différents types d'incertitudes. L'utilisation des méthodes probabilistes permet une approche de « rentabilité » efficace pour le suivi en s'assurant que les ressources sont focalisées sur les aspects essentiels de la sécurité. L'avantage principal de cette méthode est sa capacité à quantifier les risques et à les exploiter dans le processus d'optimisation. En revanche, son application reste complexe et sa mise en œuvre est limitée par la dimension du système et les données disponibles. In fine, cette approche est réservée aux composants les plus critiques dont la connaissance de l'état est précise.

6.2.4 Synthèse sur les méthodes de suivi des composants passifs

La synthèse des grands principes de chaque catégorie de méthode décrites ci-dessus est donnée dans le tableau ci-dessous. On identifie notamment les approches retenues pour l'évaluation de l'état et de la durée de vie, l'évaluation du risque, son traitement et l'approche de prise de décision.

Principes	Méthodes de classement : <i>Approche qualitative basée sur la standardisation et des données d'observation visuelle</i>	Méthodes basées sur la criticité <i>Approche pouvant être qualitative ou quantitative permettant une optimisation globale de l'inspection et de la maintenance basée sur le risque</i>	Méthodes basées sur la fiabilité mécanique <i>Approche quantitative permettant une optimisation fine de l'inspection et de la maintenance basée sur le risque et les coûts</i>
Méthode d'évaluation de l'état et de la durée de vie	Observations principalement visuelles et surveillance constante Evaluation qualitative de l'état basée sur l'agrégation d'indicateurs de l'état actuel Pas de calcul explicite de la durée de vie Importance du jugement d'experts	Méthode d'inspection variable en fonction du risque associé à la structure Approche statistique de la dégradation et approche de pondération (approche bayésienne) Calcul explicite de la durée de vie sur la base de modèles simples à complexe	Méthode d'inspection variable en fonction du risque associé à la structure Quantification des incertitudes à chaque étape Modélisation probabiliste de la dégradation et modèle physique de comportement de la structure (modèles RC) Calcul explicite de la probabilité de défaillance en fonction du temps
Evaluation de risque : - des scénarios de défaillance - des probabilités - des conséquences	Modes de défaillances identifiées par expertise Approche au mieux qualitative du risque sans formulation explicite des probabilités ou conséquences	Identification des modes de défaillance sur la base de standard et du retour d'expérience Evaluation des probabilités indépendamment de l'état de la structure pouvant être qualitative ou quantitative (statistiques pondérées) Evaluation quantitative des conséquences Matrice de risque	Mode de défaillance identifiés par expertise, standard, retour d'expérience et sur la base de modèles Calcul de probabilité de défaillance basée sur des modèles de comportement mécanique et la propagation des incertitudes (propagation d'incertitude dans les modèles RC) Modèle complet de conséquence Quantification du risque
Traitement du risque	Pas d'analyse de risque Critères qualitatifs pour déterminer la nécessité de mesures corrective ou de surveillance	Analyse de risques basée sur des matrices et des critères de type ALARP	Analyse de risques quantitative Niveau d'acceptabilité quantitatif possible
Prise de décision	Hiérarchisation qualitative des composants prioritaires	Priorisation et optimisation de l'inspection et de la maintenance sur les équipements les plus critiques Evaluation complète des coûts non réalisée	Optimisation des plans d'inspection et de maintenance basée sur le risque et les coûts

Tableau 13 Synthèse des méthodes de suivi du vieillissement des composants passifs

On remarque que l'évaluation de détérioration ou de la durée de vie démarre par le jugement d'experts et le retour d'expérience pour le classement, qui est pondéré par des approches bayésiennes et agrémenté de modèles déterministes de durée de vie dans les approches de criticité pour être complété par des modèles physiques probabiliste complets en mécano-fiabilité.

Le tableau suivant synthétise les avantages et limites des méthodes de suivi des composants passifs :

Méthodes Point de vue	Classement	Criticité	Fiabilité mécanique
Quantité de données nécessaire	Faible	Significative	Très importante
Qualité des données	Qualitative	Qualitative et quantitative	Quantitative
Complexité	Faible	Moyenne	Haute
Niveau de modélisation	Nul ou simple	Simple à complexe	Complexe
Fiabilité	Faible	Moyenne	Faible à haute selon les données disponibles
Compétence nécessaire	Basse pour l'application Haute pour la standardisation de la méthode	Moyenne à haute pour l'application Haute pour la standardisation	Haute
Evaluation du risque	Faible	Représentation globale, semi-quantitative	Représentation détaillée quantitative
Communication	Difficile	Très bonne	Très difficile
Applicabilité	Structures importantes ou nombreuses avec un enjeu faible à moyen	Structure et composant critique avec un enjeu significatif	Composant critique avec un enjeu critique et difficulté de réparation / remplacement

Tableau 14 : Applicabilité des méthodes de suivi des composants passifs

Les conclusions suivantes sont retenues comme le point de vue général proposé sur les méthodes :

- Les méthodes basées sur une classification permettent une sélection rapide des composants vieillissants critiques et un traitement simplifié des composants non critiques. Elles sont simples à mettre en œuvre sur la base d'une quantité limitée de données mais nécessitent un niveau de standardisation important au travers de référentiel(s) ;
- Les méthodes basées sur la criticité (type RBI) correspondent à un compromis entre les méthodes de classement et la fiabilité mécanique. Elles intègrent la notion de risque à la prise de décision concernant le suivi des structures sans atteindre le degré d'optimisation possible par les méthodes basées sur la fiabilité. Elles sont relativement simples à mettre en œuvre mais nécessitent de nombreuses données et un niveau important d'expertise et de standardisation.
- Les méthodes basées sur la fiabilité permettent une optimisation quantifiée de la planification du suivi des équipements basée sur la réduction du risque et des coûts. Elles sont cependant complexes de mise en œuvre et nécessitent un haut niveau d'expertise et de nombreuses données.

Ainsi le choix d'une méthode sera dépendant :

- des ressources humaines, techniques et des données disponibles sur site ;
- des standards disponibles à l'échelle de l'industrie, incluant notamment la connaissance des dégradations ;
- de la dimension et complexité (nombre de structures / composants, fonctions...) du système étudié ;
- des enjeux associés à la défaillance des structures ou composants étudiés ainsi que de son niveau de dégradation.

Sur la base de ces conclusions, on peut représenter un arbre logique de l'application de ces méthodes avec les éléments tendant à s'orienter vers les méthodes les plus standardisés (classement) et les éléments qui penche pour la complexité de l'approche (vers la fiabilité mécanique) :

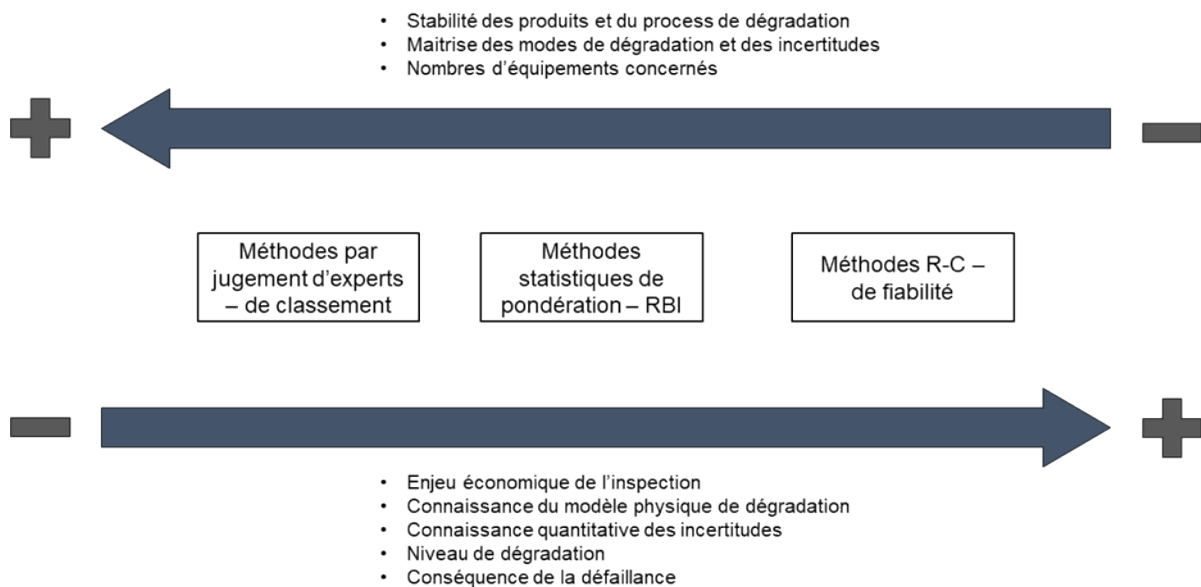


Figure 26: Logique d'application des méthodes de suivi des composants passifs

Ainsi, pour une même industrie ou pour un gestionnaire, il est souvent nécessaire d'appliquer plusieurs méthodes selon la criticité, et la taille de structures étudiées. Le passage et les liens entre les méthodes sont rarement bien définis et peu d'approches proposent une gestion globale de la problématique.

On remarque que l'application des méthodes est également fortement liée à la réglementation sur l'exploitation des structures / équipements considérés.

Le niveau de la méthode globale est souvent associé à la capacité d'obtention des données (Chapitre 3), de modélisation de la fiabilité au travers de la dégradation ou de la durée de vie (Chapitre 4) et de pondération des valeurs estimées (Chapitre 5).

6.2.5 Approches pour le suivi des composants actifs

Comme détaillé au paragraphe 2.3.1.2, les composants actifs correspondent aux systèmes électriques, électroniques ou mécaniques composés d'éléments d'usure. Du fait de leur nature et fonctionnement, en comparaison aux structures et aux systèmes passifs, ils se caractérisent par :

- une durée de vie généralement plus courte ;
- un remplacement partiel ou total des composants plus simple ;
- un coût d'inspection et de maintenance inférieur ;
- des systèmes moins coûteux ;
- des défaillances parfois cataclysmiques (particulièrement pour les composants électriques et électroniques) ;

L'approche retenue pour maîtriser leur vieillissement est généralement **fiabiliste**.

C'est-à-dire que, contrairement aux structures et aux composants passifs, on se repose le plus souvent sur des outils statistiques afin de modéliser la fiabilité des composants et calculer la probabilité de défaillance de ces systèmes. Les techniques de modélisation sont généralement plus simples et plus génériques – on raisonne sur un échantillon de dispositifs tandis qu'on peut être amené à considérer les structures une à une si elles sont très spécifiques.

Le processus de gestion du vieillissement des composants actifs repose sur trois étapes principales que sont :

- l'appréciation des risques ;
- le plan de tests ;
- la stratégie de maintenance.

6.2.5.1 L'appréciation des risques liés au vieillissement

L'appréciation des risques, telle que défini au chapitre 2 recouvre les étapes d'identification, d'évaluation et d'analyse du risque.

Au moyen, d'outils et de méthodes tels que les entretiens d'experts, le brainstorming, l'APR, l'AMDEC, les arbres de défaillances, etc., ces étapes vont permettre d'une manière formalisée :

- d'identifier les risques liés au vieillissement et les mécanismes mis en jeu ;
- d'identifier les différents événements et leurs liens logiques sous la formes de causes de défaillance et de conséquences sur le système et l'environnement ;
- d'évaluer la vraisemblance et les conséquences de ces événements de manière qualitative ou quantitative.

Les résultats de l'analyse et de l'évaluation des risques vont servir de données d'entrée au plan de gestion du vieillissement et notamment à la définition des plans de tests et de maintenance. Par conséquent, la nature des modèles utilisés pour évaluer la vraisemblance des événements devra être choisie au regard des exigences de la stratégie de maintenance comme présenté au paragraphe 7.2.5.

La construction de ces plans peut être réalisée, en respectant la réglementation afin de satisfaire les exigences de sécurité, ou bien en optimisant les coûts ou la fiabilité du système.

6.2.5.2 Le plan de tests

Les tests ont pour objectif de vérifier que les composants continuent de respecter les exigences fonctionnelles de performance.

Les tests peuvent prendre différentes formes :

- on distingue les essais périodiques, qui sont réalisés à des intervalles plus longs (en général supérieur à une semaine) et qui nécessitent souvent une intervention humaine, des diagnostics qui sont automatisés et plus fréquents ;
- les tests peuvent être de nature très variée, ils comprennent notamment :
 - o des vérifications fonctionnelles (e.g. fonctionnement du composant, plages de mesure, seuil, temps de fonctionnement – comme le temps d'ouverture ou de fermeture d'une vanne dans le cadre d'un Partial Stroke Test (PST) ou d'un Full Stroke Test (FST)),
 - o des vérifications visuelles ou outillées (e.g. vérification de l'intégrité des composants : corrosion, fissure, déformation...),
 - o des vérifications de dérives de paramètres (e.g. pression, température, niveau, intensité, tension...);
- ils peuvent avoir des objectifs différents, comme détecter une panne, un défaut, une dérive... ;
- ils peuvent être réalisés en ligne ou bien nécessiter l'arrêt de l'installation.

A chaque test est associé une couverture de test allant de 0% à 100% selon la proportion de modes de défaillance qu'il couvre. Généralement, les autodiagnostic et les essais périodiques en ligne ont une couverture de test inférieure aux essais fonctionnels ou aux inspections approfondies des composants qui requièrent l'arrêt de l'installation.

L'objectif des tests doit être étudié au regard de l'appréciation des risques, en fonction des modes de défaillances qu'ils couvrent, de la criticité des scénarios associés et de leurs contraintes de mise en œuvre.

La définition du plan et son optimisation s'articule étroitement avec le plan de maintenance.

Note : Pour rappel des informations sur les inspections, les mises à l'épreuve et surveillance sont données au paragraphe 2.3.4.2 et sur la collecte de données par inspection au paragraphe 3.

6.2.5.3 Les stratégies de maintenance et les modèles associés

On retient quatre stratégies principales de maintenance.

Note : Ce paragraphe est à lire au regard des informations apportées au paragraphe 2.3.4.3.

La première stratégie consiste à définir un plan de maintenance préventif systématique basé sur un calendrier. Les composants sont alors testés et maintenus à une date fixe. Pour définir la date de remplacement de chaque composant, on pourra opter pour une approche déterministe ou probabiliste.

L'approche déterministe consiste à estimer la durée de vie des composants à partir d'essais d'endurance réalisés au préalable dans des conditions spécifiées, à partir de l'avis d'experts ou bien à partir du retour d'expérience passé. En choisissant une durée avant remplacement inférieure à la durée de vie estimée selon une marge de sécurité acceptable, on prévoit de remplacer le composant avant sa défaillance. Bien que cette approche soit simple à mettre en œuvre, elle présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de la variabilité de l'estimation, ni des incertitudes associées.

L'approche probabiliste, quant-à-elle, consiste à estimer la probabilité de défaillance des composants à partir de recueils de données pour des installations similaires, à partir ou d'un retour d'expérience passé ou bien via des essais de fiabilité (cf. paragraphe 3.3). À partir de la répartition des probabilités, on détermine les périodicités pour optimiser le plan de maintenance avec un risque acceptable de se tromper. Les modèles utilisés correspondent aux modèles probabilistes d'évaluation de la durée de la durée de vie présentés au chapitre 4 tels que les modèles non-paramétriques (e.g. Kaplan Meier, méthodes des rangs médians) ou les modèles paramétriques (e.g. loi exponentielle, loi Gamma, loi de Weibull...). Selon les modèles choisis, l'évaluation tiendra compte ou non du vieillissement de façon explicite. Par exemple, si l'on retient la loi exponentielle qui considère un taux de défaillance constant dans le temps, le calcul de la probabilité de défaillance intègre généralement des causes liées au vieillissement, mais les modèles ne tiennent pas compte de l'accroissement de la probabilité de défaillance dans le temps. À l'inverse, en utilisant des taux de défaillance non constants et des modèles statistiques comme la loi de Weibull ou la loi log-normale, les probabilités de défaillance obtenues tiennent compte explicitement des mécanismes de dégradation liés au temps.

Les principales limites de cette stratégie sont un plan de maintenance qui peut se révéler couteux du fait des nombreux remplacement voire des arrêts de l'installation, ou à l'opposée un plan de maintenance inadapté qui prévoit un remplacement après la défaillance.

La seconde stratégie consiste à définir un plan de maintenance correctif. Dans ce cas, les composants sont remplacés après l'occurrence et la détection d'une panne ou d'un défaut. La défaillance peut être détectée automatiquement via des diagnostics, c'est plus souvent le cas pour les composants électriques et électroniques ou alors à la suite d'une inspection ou d'une action par un opérateur. L'objectif est de procéder à la réparation immédiatement, si elle n'est pas possible, des mesures compensatoires doivent être mises en place selon les résultats de l'analyse et de l'évaluation des risques. Le temps de réparation doit également être pris en compte dans l'analyse et l'évaluation des risques, notamment s'il s'agit de la réparation d'une mesure de maîtrise des risques effectuée en ligne.

Cette seconde stratégie, moins couteuse que la première, vis-à-vis des actions de maintenance, n'est possible que si la criticité des événements associés à la défaillance le permet. C'est alors l'appréciation des risques, via leur évaluation et leur analyse qui permet de déterminer si cette stratégie est envisageable.

La troisième stratégie consiste à définir un plan de maintenance préventif conditionnel basé sur un niveau de dégradation. Le niveau de dégradation est suivi dans le temps soit de manière automatisée par un système assurant le suivi ou bien par des actions d'inspection ou de test d'un opérateur (cf. paragraphe 6.2.5.2).

Lorsque la dégradation atteint un seuil prédéfini, une action de maintenance est alors prévue. À partir de la connaissance sur le niveau de dégradation et sur la cinétique de dégradation, il est possible de prévoir une date de maintenance avant l'occurrence de la défaillance.

Cette troisième stratégie nécessite un suivi régulier de l'état du système, soit via un système automatisé, soit via des actions opérateurs et doit être réalisé suffisamment fréquemment afin de pouvoir détecter le besoin de maintenance avant l'occurrence de la défaillance. Il s'agit de la stratégie qui nécessite le plus de moyens de test pour être déployée, mais qui en contrepartie, permet d'optimiser le nombre de maintenances tout en minimisant l'occurrence de défaillances.

La quatrième stratégie consiste à définir un plan de maintenance prévisionnelle. Pour ce faire, en se basant sur des données issues du retour d'expérience et sur la collecte de données terrain (cf. paragraphe 3.1), on utilise des modèles probabilistes de prévision de la défaillance. En évaluant, la cinétique de dégradation, on planifie ainsi au plus mieux les actions de maintenance à réaliser avant l'occurrence de la défaillance. Les modèles à disposition (cf. chapitre 4) sont, par exemple, les processus stochastiques, les réseaux bayésiens ou les modèles ARMA qui rendent compte de l'évolution de la dégradation dans le temps. Plus rarement, on pourra également se tourner vers des modèles basés sur la physique (méthodes R-C, modèles SVA), lorsque les ressources sont disponibles en termes de données, de moyens financiers et d'expertise.

Cette stratégie s'adresse aux composants pour lesquels on dispose de données représentant l'état de dégradation dans le temps afin d'être en mesure de modéliser la cinétique.

Cette stratégie nécessite des données fiables et une expertise plus poussée sur les modes de dégradation et les modèles fiabilistes utilisés.

Le tableau suivant synthétise les avantages et limites des stratégies de gestion du vieillissement des composants actifs :

Stratégies Point de vue	Préventif systématique		Correctif	Préventif conditionnel	Prévisionnel
	Déterministe	Probabiliste			
Quantité de données nécessaire	Faible	Significative ou très importante	Aucune	Significative	Très importante
Qualité des données	Qualitative ou quantitative	Quantitative	/	Quantitative	Quantitative
Complexité	Faible	Moyenne	Très faible	Faible	Elevée
Niveau de modélisation	Simple	Simple à complexe	Nul	Simple	Très complexe
Fiabilité	Faible	Moyenne	/	Haute	Moyenne à haute
Compétence nécessaire	Basse	Moyenne	Basse	Moyenne pour le suivi et basse pour la méthode	Haute
Communication	Très bonne	Bonne	Très bonne	Très bonne	Difficile
Applicabilité en fonction du risque (plus la gravité est élevée, plus...)	Faible	Moyenne à haute suivant la qualité et la quantité de données	Très faible	Moyenne à haute suivant la fréquence du suivi	Moyenne à haute suivant la qualité et la quantité de données
Applicabilité en fonction de la nature de défaillance	Catalectique et dégradation	Catalectique et dégradation	Catalectique et dégradation	Dégradation	Dégradation

Tableau 15 : Applicabilité des méthodes de suivi des composants actifs

Ainsi la stratégie de maintenance retenue dépend notamment :

- de la criticité des événements associés à la défaillance du composant ;
- des contraintes réglementaires en termes de gestion du risque ;
- des ressources humaines et des données disponibles ;
- de la possibilité ou non de suivre l'état de dégradation du système dans le temps ;
- des coûts de mise en œuvre (acquisition, exploitation, gestion du risque...).

6.2.5.4 L'optimisation des plans des tests et de maintenance

La périodicité des tests et des maintenances est un optimum fixé à partir des résultats de l'analyse et de l'évaluation des risques et des coûts associés au plan de tests et de maintenances. Cette analyse intégrée, sans être exhaustif, les critères suivants :

- la durée de vie estimée des composants ;
- la criticité des conséquences en cas de défaillances des composants,
- le retour d'expérience de l'exploitant ;

- l'architecture du composants (éventuelles redondances) ;
- la durée des actions de test et de maintenance ;
- la présence ou non d'autodiagnostic ;
- la périodicité des arrêts de l'installation ;
- les résultats des calculs de fiabilité ;
- les exigences techniques et réglementaires ;
- les risques générés par une fréquence de test ou de maintenance trop importante (par exemple si le test ou la maintenance est un facteur d'usure).

6.2.6 Problématiques pour les technologies émergentes

Les technologies émergentes se caractérisent par l'absence de connaissances empiriques des causes de défaillance et des mécanismes de dégradation, ainsi que par l'absence de données permettant de quantifier leurs probabilités de défaillance.

De ce fait, aucune des approches de programmation de l'inspection n'est directement applicable pour le vieillissement des technologies émergentes dans la mesure où celles-ci sont construites sur la base de jugements d'experts, de retour d'expérience et de données statistiques. Intégrer une technologie émergente dans une méthode quelle qu'elle soit peut néanmoins se faire en adoptant une approche méthodique pour identifier, évaluer et mettre à jour les risques associés à ces technologies. Voici, sur le principe, quelques étapes clés pour adapter des méthodes aux nouveaux processus et équipements :

- **Identification des nouveaux risques** : Chaque nouvelle technologie peut introduire des risques spécifiques. Il est donc nécessaire d'identifier et documenter les potentiels modes de défaillance, les types d'endommagement, et les conditions d'exploitation spécifiques. Cette analyse est souvent réalisée en collaboration avec des experts en process sur la base de jugements d'experts et de retours d'expérience sur des procédés ou des équipements semblables. Des méthodes types APR, AMDEC, arbres de défaillances, etc. peuvent être mises en œuvre à ce stade.
- **Mise à jour des données de fiabilité** : pour les nouveaux équipements ou configurations, il est souvent nécessaire de collecter de nouvelles données de fiabilité. Il peut être intéressant d'utiliser les données de fiabilité provenant de l'industrie ou d'équipements similaires ou d'intégrer les résultats d'essais accélérés.
- **Évaluation et catégorisation des risques** : les méthodes de gestion du suivi et de la maintenance se basent sur la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement et de ses conséquences. Avec les nouveaux procédés et équipements, la probabilité peut changer en raison de nouveaux paramètres, par exemple, des conditions opérationnelles plus sévères. Des méthodes de type R-C peuvent être envisagées pour modéliser des mécanismes physiques connus, ou des méthodes de pondération de données statistiques (REX ou essais) tenant compte de l'incertitude associée à la technologie émergente. Les conséquences doivent également être évaluées en fonction des spécificités des potentiels de dangers, des produits et de l'équipement. Enfin, il peut être nécessaire d'adapter les matrices de criticité et les seuils d'acceptabilités en fonction de la confiance dans l'approche retenue.
- **Définition des plans d'inspection adaptés** : les nouveaux risques peuvent nécessiter des techniques d'inspection spécifiques, des fréquences d'inspection accrues, ou des technologies avancées de détection. Le choix de ces plans d'inspection doit tenir compte de l'incertitude associée à la maîtrise des dégradations (notamment leur cinétique) et des techniques d'évaluation de cette dégradation.
- **Intégration dans un système de gestion des risques** : mettre en place un processus de suivi des inspections, des dégradations détectées, et des actions correctives pour le nouveau procédé et équipement dans le plan de gestion des risques est une nécessité. Cela peut inclure des révisions régulières du plan d'inspection / maintenance pour ajuster les actions selon l'évolution des risques.

- **Formation et sensibilisation** : sensibiliser les équipes d'inspection et de maintenance aux nouveaux risques et aux méthodes de détection et de maintenance adaptées pour les nouveaux équipements et procédés est également fondamental.
- **Retour d'expérience et ajustement** : enfin, une fois que les inspections et maintenances ont été planifiées puis réalisées, le retour d'expérience (REX) doit être particulièrement suivi et doit permettre d'ajuster les modèles de fiabilité pour mieux cibler les inspections futures et optimiser les coûts.

L'approche consiste donc à adapter les méthodes en fonction des nouvelles données et des risques spécifiques aux processus ajoutés, tout en assurant une documentation et un suivi rigoureux permettant l'évolution rapide de ces méthodes vers une standardisation.

6.3 Pistes de réflexion sur l'intégration de la gestion du vieillissement dans les études de sécurité et les études de dangers

Pour rappel, dans les études de sécurité, l'évaluation des risques réalisée intègre le vieillissement des équipements par des approches statistiques globale ou dédiée (lorsque des données spécifiques sont disponibles). La dégradation est en effet intégrée de fait par les probabilités d'occurrence :

- des causes ou événements initiateurs lorsque la donnée est disponible ;
- des événements redoutés centraux qui intègrent l'ensemble des causes.

Le retour d'expérience est rarement suffisamment distingué vis-à-vis des causes de vieillissement pour réaliser l'ensemble des analyses de chaque équipement. In fine, une approche globale est souvent réalisée au travers d'une probabilité de défaillance d'ensemble.

S'il semble complexe de réaliser des analyses détaillées de l'ensemble des modes de défaillance de vieillissement dans les études de sécurité sans une évolution massive des bases de données, il pourrait néanmoins être intéressant de creuser les possibilités d'interaction entre les méthodes de suivi et les méthodes d'analyse de risque.

Les paragraphes suivants synthétisent les éléments d'interaction identifiés par l'Ineris sur la base des travaux réalisés pour ce document. S'ils peuvent constituer une base de perspective de recherche et développement, ces constats ne sont pas exhaustifs. Les répercussions économiques et techniques de ces propositions ne sont par ailleurs pas évaluées à ce stade.

Dans la suite de ce paragraphe, nous nous plaçons dans le cas particulier des études de dangers.

6.3.1 Synthèse des possibilités d'interaction étude de dangers et suivi des équipements

Plusieurs interactions sont possibles entre les approches de suivi des équipements et les études de dangers.

En effet, on remarque tout d'abord que quelle que soit l'approche, une identification des structures, composants ou équipements dont la dégradation pourrait générer une défaillance est réalisée. La différence majeure est associée à l'objectif d'identification dans ces approches : dans le cas des études de dangers, l'identification est pilotée par l'importance du risque généré dans l'environnement du site industriel, alors que dans les approches de suivi, les conséquences internes, que ce soit sur le process ou sur le personnel seront également intégrées dans l'analyse. Les conséquences seront généralement classées d'un point de vue principalement économique (intégrant l'ensemble des risques) dans les approches de suivi alors qu'elles seront exclusivement orientées sur le risque humain externe dans les études de dangers.

Ensuite, les approches présentent globalement toute une forme d'analyse du risque et d'évaluation (étude détaillée du risque) intégrant une estimation de la vraisemblance (qualitative à quantitative) et des estimations des conséquences (humaine, économique etc...) :

- **Pour l'estimation de la vraisemblance**, on retrouve dans des approches de suivi l'estimation de probabilités de défaillance pouvant être basée sur du retour d'expérience, du jugement

d'experts, des essais accélérés ou des modèles physiques. Dans les études de dangers, l'approche privilégiée est celle du retour d'expérience. On constate que de nombreuses approches utilisent la pondération de statistique également dans les approches de suivi, notamment pour les approches de type RBI. On distinguera néanmoins fortement les approches de pondération, basée sur des éléments d'environnement et de sécurité pour les EDD et plutôt basés sur des notions de connaissances disponibles, d'historique de fonctionnement, d'inspection et de maintenance dans les approches de suivi. Par ailleurs, dans les études de danger, il est d'usage de considérer les taux de défaillance comme étant constants dans le temps, tandis que pour le suivi des équipements ce taux est réactualisé régulièrement notamment au gré des inspections et peut être considéré non constant pour des projections dans le temps.

- **Pour l'estimation des conséquences**, il existe également des similitudes entre les approches. Généralement fortement détaillées et associées à des modèles physiques dans les études de dangers, elles le sont généralement moins dans les approches de suivi, bien que parfois associées à des modèles physiques également. Les conséquences humaines sont perçues différemment, puisque dans un cas, l'analyse porte sur l'environnement du site tandis que dans l'autre, l'ensemble des personnes sur et hors site est considéré. Par ailleurs, pour les approches de suivi s'ajoute généralement une estimation des conséquences financières liées aux pertes économiques.

Dans les deux approches, optimisation du suivi comme étude de dangers, des évaluations sont donc réalisées pour la prise de décision. Si des notions, telles que la criticité, peuvent apparaître dans les deux approches, elles sont rarement de même nature et l'utilisation de ces criticités est relativement différente :

- En effet, **dans les approches de suivi**, l'objectif est de réaliser une optimisation de l'inspection et de la maintenance basée sur le coût des conséquences vis-à-vis du coût des inspections et de la maintenance. En ce sens, les approches sont souvent très relatives à l'industrie voire à l'industriel ou même au site sur lesquels est appliquée l'approche. Les valeurs estimées ne sont ainsi pas nécessairement comparables entre elles du fait de pondérations locales et de gestion des priorités différentes. Pour autant, il existe également des seuils d'acceptabilité, généralement vis-à-vis du risque humain. Ceux-ci peuvent être issus de la politique interne ou des réglementations (travail, environnement). Les actions qui découlent de l'analyse de risques seront donc pilotées par une optimisation des coûts et des seuils d'acceptabilité des risques humains.
- A contrario, **dans les études de dangers**, l'exploitation des analyses de risques est basée uniquement sur des seuils d'acceptabilité du risque humain. Ainsi, sur la base d'un référentiel national d'acceptabilité des risques, les actions de sécurité sont déterminées (ajout de barrière et de mesures de prévention, de protection, de limitation, arrêt d'une installation, etc...).

En somme, il existe de nombreux points communs et différences entre les approches d'étude de dangers et de suivi des équipements. On notera néanmoins que les objectifs sont différents ce qui peut constituer des obstacles majeurs à une interaction étroite entre les méthodes.

Du point de vue de l'utilisation des résultats d'une méthode de suivi dans les études de dangers, on identifie notamment les obstacles suivants :

- une difficulté à comparer des probabilités évaluées par des approches très différentes : générales dans les études de dangers (EDD) et associées à des dégradations spécifiques pour le suivi ;
- une méthode de suivi souvent qualitative ou semi-quantitative avec un objectif de hiérarchisation et non d'évaluation précise de probabilité : existence des probabilités de défaillance explicites rares ;
- pour les études de dangers, des méthodes quantifiées nécessitant beaucoup de REX et une forme de normalisation sectorisée des pratiques qui n'existent pas sur tous les sites ;
- les fréquences dans les EDD sont non spécifiques au vieillissement et donc difficiles à moduler par la seule connaissance d'une probabilité de défaillance du vieillissement, sauf dans le cas où la probabilité de vieillissement devient prédominante sur le reste en devenant la cause majeure de défaillance ;

- les approches de suivi sont très variables d'une industrie à une autre et d'un industriel à l'autre ; l'exploitation dans des approches EDD quasi standardisées semble donc très difficile ;
- la fréquence de réévaluation de la fréquence des EDD est différente des réévaluations d'estimation de probabilité de défaillance dans les approches de suivi. L'une dépend ainsi mécaniquement du temps et est valable pour une période donnée, tandis que l'autre (EDD) est une valeur indépendante du temps.

L'ensemble de ces éléments tendent à démontrer qu'un usage des résultats des approches de suivi directement dans les études de dangers est complexe si ce n'est impossible à généraliser à l'heure actuelle. Il semble néanmoins que des interactions peuvent être développées notamment en considérant que les études de dangers constituent un référentiel de risque général et les études de suivi des hiérarchisations locales actualisées d'estimation du risque de défaillance par dégradation.

En ce qui concerne les technologies émergentes, les approches pas à pas ne peuvent être directement utilisées pour alimenter l'évaluation des probabilités de défaillance « références » qui seront utilisées pour étudier l'acceptabilité du risque. Ainsi, d'un point de vue technique, et s'agissant d'estimer une probabilité de défaillance pour l'étude de dangers, les méthodes mécano-fiabiliste ou plus généralement de type résistance-contrainte pourraient être d'intérêt. En effet, dans la mesure où des modèles physiques cohérents peuvent être construits, ces méthodes peuvent apporter une connaissance approfondie des facteurs d'importance associés à la défaillance par dégradation comme une quantification probabiliste précise de la défaillance. Cette méthode est d'intérêt car il s'agit de la méthode nécessitant le moins de retour d'expérience ou jugement d'experts sur la technologie en fonctionnement pour être utilisée. La consistance des approches est basée sur un cadre probabiliste de données primaires (matériau, géométrie, modèle etc...) et la capacité à modéliser la dégradation et ses effets. Il serait donc nécessaire de développer des modèles et un cadre d'évaluation des incertitudes primaires pertinent. Ce type d'approche est particulièrement fastidieuse et ne peut raisonnablement pas être envisagé pour l'ensemble des équipements tout au long de leur durée de vie. Elle pourrait néanmoins être appliquée pour l'analyse préliminaire de quelques équipements critiques en attente de la production de données de retour d'expérience ou d'essai. A terme, les résultats de ces modèles devront être confrontés aux résultats obtenus par des méthodes empiriques (essais de fiabilité, retour d'expérience) afin de les confirmer ou à minima de réduire l'incertitude sur ces valeurs. Il est envisageable qu'une ou plusieurs itérations soient nécessaires dans le processus d'estimation de la probabilité d'événements pour une installation

6.3.2 Pistes de réflexion

Ainsi on peut considérer les pistes d'interaction à court et moyen terme suivantes :

- Quelles que soient les méthodes employées, l'intégralité des composants ou équipements identifiés comme étant à risque dans les études de dangers et susceptible de se dégrader devraient être identifiés dans les études de suivi. Cela est probablement très souvent le cas mais la vérification, de ce fait, mériterait néanmoins une attention particulière.
- Pour ces équipements, les conséquences des défaillances devraient être cohérentes. Ainsi, l'étude de dangers pourrait apporter le cas maximal associé à la défaillance tandis que les études de suivi pourraient apporter la connaissance des conséquences structurelles d'une défaillance et donc une modélisation plus fine des conséquences.
- La hiérarchisation des risques associés aux équipements étudiés dans l'EDD pourrait être comparée avec la hiérarchisation dans les approches de suivi basée sur le risque. Une pondération des probabilités pourrait également être proposée aux équipements suivis en fonction du risque évalué dans l'étude de dangers ou de la décote attribuée à la méthode de suivi.

Dans le cadre de l'amélioration à plus long terme des approches de suivi et des études de dangers, quelques perspectives pourraient être envisagées :

- Pour les équipements de l'étude de dangers, les probabilités évaluées pourraient permettre de fixer un « objectif de fiabilité » au vieillissement des équipements évalués par des méthodes de suivi semi-quantitatives ou quantitatives. Cela pourrait se traduire par exemple par une

comparaison des statistiques initiales utilisées, des pondérations, une comparaison des classes de probabilités finales estimées, voire fixer des seuils admissibles pour les valeurs quantitatives.

Les méthodes les plus avancées de modélisation de type R-C, pourraient également être sources de données de probabilité pour les études de dangers dans le cas d'inconsistance des données statistiques de défaillance par exemple.

7 Conclusions et perspectives générales

La maîtrise des risques industriels repose, entre autres, sur la réalisation d'études telles que les études de dangers ou les études de suivi du vieillissement. Ces dernières correspondent à des démarches systématiques d'identification, d'analyse et d'évaluation des risques posés par l'exploitation des systèmes industriels et peuvent faire intervenir plusieurs méthodes et outils.

Alors que ces méthodes et outils sont adaptés aux technologies matures, il apparaît que leur application aux technologies émergentes rencontre plusieurs obstacles notamment lors des étapes de quantification probabilistes des événements et lors de la caractérisation, du suivi et de la maîtrise des risques causés par le vieillissement des systèmes.

Après avoir introduit un certain nombre de notions fondamentales à la réalisation et à la compréhension de ces études, le rapport se compose de deux parties.

Une **première partie** de ce rapport a été consacrée à la rédaction d'un état de l'art des méthodes de quantification probabilistes applicables aux analyses de risques. Le processus de quantification comprend la collecte de données, la modélisation et la pondération des probabilités. Le fonctionnement des méthodes applicables a été décrit pour chacune de ces étapes. Ensuite, dans le but de guider l'analyste dans le choix d'une ou plusieurs de ces méthodes, les avantages, les limites et contraintes d'utilisation ont été soulignées. Finalement, toujours dans cet objectif, une synthèse comparative a été proposée en mettant en avant leur capacité à modéliser une probabilité avec peu ou pas de données de retour d'expérience disponible, et leur capacité à représenter l'évolution d'une probabilité d'événement en fonction du temps.

Il ressort de cette analyse que l'ensemble des méthodes de modélisation envisagées nécessitent beaucoup de données de retour d'expérience afin de construire ou paramétrer des modèles probabilistes exhaustifs. En revanche, la mise en œuvre d'une approche de pondération au travers des statistiques bayésiennes, de modèles semi-quantitatifs ou de modèles physiques et / ou statistiques permet d'obtenir de manière robuste une estimation crédible des probabilités d'événements.

Concernant la représentation dynamique de la probabilité, on distingue deux familles de modèles, d'une part, les méthodes non paramétriques et les fonctions de densité de probabilités qui peuvent représenter l'évolution de la probabilité en fonction du temps et d'autre part, les modèles ARMA, les processus stochastiques, les réseaux bayésiens et les méthodes R-C qui peuvent représenter l'évolution de l'état d'un système en fonction du temps et donc l'évolution de la probabilité de défaillance en fonction du temps.

Il ressort de l'analyse des différents modèles, leur capacité relative à :

- proposer une estimation de la probabilité avec peu ou pas de données collectées par le retour d'expérience ;
- présenter la probabilité sous la forme d'un résultat dynamique, dépendant du temps, représentatif des périodes de vieillissement d'une installation.

Méthodes de modélisation et de pondération	Capacité de modélisation avec peu ou pas de données	Représentation dynamique de la probabilité
Méthodes non paramétriques : Kaplan-Meier, rangs médians	Non ¹	Oui sous la forme d'une durée de vie
Fonction de densité : exponentielle, Gamma, binomiale, Weibull, lognormale...	Non ¹	Selon la fonction de densité retenue, sous la forme d'une durée de vie
Modèle ARMA	Non	Oui, modélisation de la détérioration

Méthodes de modélisation et de pondération	Capacité de modélisation avec peu ou pas de données	Représentation dynamique de la probabilité
Processus stochastiques : Gamma, Wiener, markoviens	Non	Oui, modélisation de la détérioration
Réseaux bayésiens : modèles markoviens, filtre de Kalman, filtres particuliers	Non	Oui, modélisation de la détérioration
Méthodes basées sur la physique : Résistance-Contrainte	Oui, mais seulement pour des causes précises et identifiées	Oui, modélisation de la détérioration possible
Méthodes bayésiennes	Oui	Selon la fonction de densité retenue, sous la forme d'une durée de vie
Pondération des causes par un modèle semi-quantitatif	Oui	Selon la forme de la donnée que l'on pondère
Pondération par des modèles basés sur la physique et les statistiques : FIDES, NSWC, ...	Oui	Selon la fonction de densité retenue, sous la forme d'une durée de vie
Pondération par le modèle de Cox	Non, des données sont nécessaires pour paramétrer le modèle	Selon la fonction de densité retenue, sous la forme d'une durée de vie

Tableau 16 : Capacité des méthodes à modéliser la probabilité avec peu de données de retour d'expérience et à représenter l'aspect dynamique de la probabilité

Note 1 : les modélisations statistiques via les densités de probabilité peuvent être utilisées avec peu de données et servir de loi a priori dans le cadre d'une démarche de pondération basée sur les statistiques bayésiennes ou comme modèle de base que l'on pondère par le modèle de Cox ou par les modèles basés sur la physique et les statistiques.

Il est à noter que l'ensemble de ces modèles requiert des développements importants ainsi qu'une expertise plus poussée que celle nécessaire à la mise en place des méthodes pour les technologies matures.

La **seconde partie** de ce rapport présente les méthodes de suivi du vieillissement, en distinguant les composants passifs et les structures d'une part et les composants actifs d'autre part. Pour chaque approche et méthode envisagée, en faisant le lien avec les méthodes quantitatives présentées en première partie, les caractéristiques et contraintes d'utilisation sont détaillées afin de guider l'analyste. Ensuite, le rapport pose la problématique de l'articulation entre le suivi du vieillissement et les études de sécurité. Les similarités et les obstacles à une interaction entre les deux études sont présentés et plusieurs pistes sont investiguées à court et moyen terme. Il est notamment proposé :

- d'étudier la cohérence des deux études vis-à-vis des équipements identifiés comme étant à risque ;
- d'étudier la cohérence des conséquences, c'est-à-dire que l'on pourrait tirer de l'étude de dangers le cas maximal associé à la défaillance et se servir de l'étude de suivi du vieillissement pour obtenir une modélisation plus fine ;
- de comparer la hiérarchisation des risques entre les deux études et envisager une pondération des probabilités des équipements suivis en fonction du risque évalué dans l'étude de dangers ou bien une décote de la probabilité des EDD attribuée à la méthode de suivi des équipements.

A plus long terme, il pourrait être envisagé dans les études de dangers de fixer des objectifs de fiabilité qui vont au-delà de la maîtrise du vieillissement par la définition d'une durée de vie utile lors de laquelle

le taux de défaillance est considéré constant. Cela pourrait se traduire notamment par des pondérations ou des seuils pour les valeurs quantitatives.

En définitive, des rapprochements entre les études de sécurité et les études de suivi du vieillissement sont envisageables. Il est cependant important de se questionner s'il est souhaitable d'aller au-delà de l'étude de la cohérence des différentes études et d'évoluer vers un rapprochement plus marqué, dans la mesure où cela peut impliquer une complexification des études et / ou un besoin de mises à jour plus fréquentes.

Ce document traite également du cas particulier du vieillissement et de la quantification probabiliste pour les technologies émergentes pour lesquelles les données sont peu nombreuses et les mécanismes de vieillissement mal connus.

Pour la gestion du vieillissement des technologies émergentes, il est recommandé dans un premier temps d'adapter la fréquence et la nature des actions d'inspection et de maintenance, puis de proposer un suivi rigoureux permettant une évolution vers une standardisation au fur et à mesure de la collecte de retour d'expérience.

Du point de vue de la quantification probabiliste, il peut être envisagé de développer des modèles basés sur la physique comme les modèles résistance-contrainte et de les confronter à des méthodes empiriques comme des essais de fiabilité ou du retour d'expérience afin de définir des probabilités avec peu de données qui modélisent la dégradation d'un système.

Par la suite, ce travail pourra être complété, d'une part, de développements techniques et scientifiques afin de préciser et d'adapter les méthodes proposées pour tenir compte des contraintes des études de dangers ; et d'autre part, des cas d'applications, notamment basés sur des technologies émergentes comme l'hydrogène-énergie gazeux ou liquide ainsi que le stockage électrochimique qui pourront être étudiés dans le but d'illustrer les méthodes à l'aide de cas concrets.

8 Références

- [1] Directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 relative à la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses (directive Seveso III), JOUE L 197, 24 juillet 2012.
- [2] AFNOR, Management du risque – Lignes directrices, NF ISO 31000, 06/2018
- [3] AFNOR, Management du risque – Techniques d'appréciation du risque, NF EN IEC 31010, 08/2019
- [4] Delage S., Développement d'une méthodologie de qualification de systèmes complexes par des essais de fiabilité, Université d'Angers, 2018
- [5] ISO, ISO/TR 12489:2013, Pétrole, pétrochimie et gaz naturel, Modélisation et calcul fiabilistes des systèmes de sécurité, Edition 1, 2013
- [6] Code de l'environnement, art. L. 181-25.
- [7] A., 29 septembre 2005, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation, NOR : DEVP0540371A
- [8] A., 26 mai 2014, relatif à la prévention des accidents majeurs dans les installations classées mentionnées à la section 9, chapitre V, titre Ier du livre V du code de l'environnement, NOR : DEVP1316983A
- [9] Circ., 10 mai 2010, récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003, NOR : DEVP1013761C
- [10] Ineris, Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées, Omega 25, DRA-18-171229-00918A, 26/01/2018
- [11] Ineris, Probabilité dans les études de sécurité et études de dangers, Omega 24, DRA-18-171229-00933A, 23/04/2018
- [12] Ineris, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (EAT-DRA-76), Etude de dangers d'une installation classée – Omega 9, DRA-15-148940-03446A, 01/07/2015
- [13] RIVM, Handleiding Risicoberekeningen Bevi, Inleiding, V4.3, 01/01/2021
- [14] HSE, Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments, 02/02/2019
- [15] Vlaanderen, Omgeving, Handboek Risicoberekeningen, Richtlijnen voor kwantitatieve risicoanalyse, indirecte risico's en milieurisicoanalyse, V2.0, 01/04/2019
- [16] Taylor Associates ApS, Hazardous Materials Release and Accident Frequencies for Process Plant Volume II, Process Unit Release Frequencies, Version 1 Issue 7, 09/2006
- [17] ICSI, L'analyse de risque, Fréquence des événements initiateurs d'accident, Groupe d'échange « Fréquence des événements », Les cahiers de la sécurité industrielle, 09/2009
- [18] SINTEF, NTNU, Offshore and Onshore Reliability Data (OREDA), DNV GL, 6th Edition, Volulme 1 -Topside Equipment, 2015
- [19] Ineris, Panorama des sources de données utilisées dans le domaine des analyses quantitatives des risques pour les études de dangers, Ineris - 203506 - 2723900 - v1.0, 10/11/2021
- [20] Ineris, Hiérarchisation des bases de données génériques, DRA-15-149432-07746A, 26/08/2015
- [21] Ineris, Final Report, International Benchmark on regulations and practices as regards managing industrial installation ageing – INERIS - DRA-09-102957-07985C, 2009
- [22] HSE. Management of ageing. A framework for nuclear chemical facilities. TWI Limited, Research Report 912, 2012
- [23] Safelife, Rapports de recherche projet SAFELIFE, www.safelife.eu-vri.eu, 2015

- [24] IMdR, CHATEAUNEUF A., AQUES Y., FADDOU R., Projet IMdR n°P10-2 : « Méthodes d'évaluation de la sûreté des structures vieillissantes – panorama et benchmarking », 2014
- [25] Tebbi O., Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés. Autre. Université d'Angers, 2005. Français. tel-00009407
- [26] ISO, Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel — Collecte et échange de données de fiabilité et de maintenance des équipements, ISO 14224:2016, 10/2016
- [27] AFNOR, Collecte et Exploitation du Retour d'Expérience en Sûreté de Fonctionnement des systèmes et équipements, NF C20-312, 05/2020
- [28] IEC, Dependability management - Part 3-2: Application guide - Collection of dependability data from the field, IEC 60300-3-2, 10/11/2004
- [29] Ineris, Méthode d'évaluation des fréquences d'occurrence et des probabilités de défaillance à partir des données de retour d'expérience, DRA-15-149432-05862A, 01/07/2015
- [30] Villemeur A., Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Fiabilité – Facteurs humains, informatisation, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles, 1988
- [31] Signoret J.-P., Leroy A., Reliability Assessment of Safety and Production Systems, Analysis, Modelling, Calculations and Case Studies, Springer; 2021
- [32] Proccacia H., Introduction à l'analyse probabiliste des risques industriels, sciences du risque et du danger, Lavoisier, 2009
- [33] Seyyede Zohreh Fatemi. Planification des essais accélérés : optimisation, robustesse et analyse. Autre. Université d'Angers, 2012. Français. NNT.: tel-01004379
- [34] AFNOR, Essais de fiabilité – Plans d'essai de conformité pour un taux de défaillance constant et une intensité de défaillance constante, NF EN IEC 61124, 04/2023
- [35] Lannoy A., Introduction à la fiabilité des structures, Technique de l'ingénieur, SE2070 V2, 10/07/2011
- [36] Sandia, Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards, SAND2009-0874, March 2009
- [37] Brian D. Ehrhart, Ethan S. Hecht, and Benjamin B. Schroeder. Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.1 Technical Reference Manual. SAND2023-14224, 12/2023
- [38] UTE, Guide FIDES 2009, Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques, Edition A, 09/2010
- [39] NSWC, Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, Logistics Technology Support, Carderock Division, NSWC-10, 01/2010
- [40] INL, Cadwallader L. C., Failure Rate Estimates for Passive Mechanical Components, INL/EXT-18-51396, 10/2018
- [41] Brissaud F. et al., 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, Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance, PENTOM 2007, Mons, Belgique, hal-00196765v2, version 1, 13/12/2007
- [42] SAMCO, Guideline for the Assessment of existing structures – Structural Assessment Monitoring and Control, 2006
- [43] SETRA. Guide méthodologique : Gestion des ouvrages d'art, à l'usage des départements et autres collectivités locales, Service d'Etudes Techniques des Routes et des Autoroutes, Mai 2006
- [44] NHI. Bridge Inspector's Reference Manual, National Highway Institute, 2012
- [45] AASHTO Bridge Element Inspection Guide Manual, AASHTO, 2010
- [46] Hydro-Québec, Marc Morin. Gestion des risques en sécurité civile. Hydro- Québec, Direction du développement, ISBN 978-2-550-54258-2, juin 2005.
- [47] IEC, Gestion de la sûreté de fonctionnement – Partie 3-11 : Guide d'application –Maintenance basée sur la fiabilité Dependability management, IEC 60300-3-11, 2009

- [48] AFNOR, Cadre d'inspection basée sur les risques, NF EN 16991, 04/2018
- [49] ASME CRTD-20-1, "Risk-Based Inspection - Development of Guidelines: Volume 1," General Document, 1991
- [50] API RP 580 - Recommended Practice for Risk-Based Inspection-API – Third edition – 2016
- [51] API RP 581. Risk-based Inspection Methodology. API Recommended Practice 581. 3rd Edition, I 2016.
- [52] EEMUA Publication 159 Above ground flat bottomed storage tanks - a guide to inspection, maintenance and repair, 2018
- [53] IAEA, 'Ageing Management for Nuclear Power Plants', 'Safety Guide NS-G-2.12. 2009
- [54] Lannoy A., Lemaire M., Delage A. (dir.) La Fiabilité en mécanique Des méthodes aux applications, Presse des mines, 2018
- [55] AFNOR, Terminologie de la maintenance – juin 2001", "Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel – collection EdF R&D, NF EN 13306, 2001
- [56] Guides UIC / UFIP DT32, Guide pour l'établissement d'un plan d'inspection des appareils à pression Guide professionnelle Externe. UIC/UFIP, 2008
- [57] Guides UIC / UFIP DT84, Guide pour l'établissement d'un plan d'inspection permettant de définir la nature et les périodicités d'inspection périodiques et de requalifications périodiques pouvant être supérieures à cinq et dix ans, 2010
- [58] IMdR, « Méthodes avancées d'estimation de la cinétique de dégradation d'un composant ou d'une structure », Projet de l'IMdR P23-01, T2 – Guide méthodologique, 2023.0975_IMdR-P23.1_T2, indice A0, 2024
- [59] IMdR, « Méthodes avancées d'estimation de la cinétique de dégradation d'un composant ou d'une structure », Projet de l'IMdR P23-01, T3 – Etat de l'art bibliographique, 2023.0975_IMdR-P23.1_T3, indice A2, 2024
- [60] Proust C., Dijkhof, P., Leakage characterization of H₂ dispensers, MulthyFuel, Deliverable 2.1, [confidential], 11/12/2023
- [61] Proust C. and al., A new method to quantify the leakage scenarios (frequencies and flowrates) on hydrogen high pressure components. 10th International Conference On Hydrogen Safety (ICHHS 2023), Sep 2023, Québec (CA), Canada. pp.595-607. (ineris-04336365)
- [62] Proust C. et al., Nouvelle méthode de prédiction des fréquences et débits de fuite des composants hydrogène haute pression, Lambda Mu 24, 10/2024
- [63] Morcillo M., Chico B., Diaz I., Cano H., de la Fuente D., Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review, Corrosion Science, 2013, 77 : 6-24
- [64] Castaño J.G., Botero C.A., Restrepo A.H., Agudelo E.A., Correa E., Echeverría F., Atmospheric corrosion of carbon steel in Colombia, Corrosion Science, 2010 52 : 216-223
- [65] Karaoui H. (2001), Nouveaux Outils pour la Conception Fiable des Structures, PHD memory, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, defended dec. 7th
- [66] Saranik M., Conception parasismique robuste de bâtiments à base d'assemblages boulonnés", thèse de doctorat de l'Ecole Central de Lyon, 12/12/2011
- [67] Liu J., Ouyang H., Feng Z., Cai Z., Liu X., Zhu M., Study of self-loosening of bolted joints excited by dynamic axial load, Tribology International, 2017, 215 : 432-451
- [68] Pai N.G., Hess D.P., Experimental study of loosening of threaded fasteners due to dynamic shear loads, J. Sound and Vibrations, 2022, 253 : 585-602
- [69] Kragelskii I.V. (1965), « Friction and Wear », Butterworths, London
- [70] Zum Gahr K.H. sliding wear of ceramic-ceramic, ceramic-steel and steel-steel pairs in lubricated and unlubricated contact, Wear, 1989, 133 : 1-22
- [71] Lancaster J.K., Abrasive wear of polymers, Wear, 1969, 14: 223-239

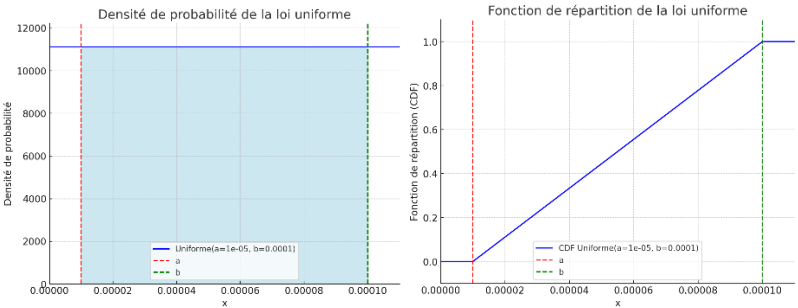
9 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Lois de probabilités usuelles
- Annexe 2 : Définitions de concepts en lien avec la maîtrise du vieillissement
- Annexe 3 : Définitions des principaux modes de dégradation
- Annexe 4 : Modèles d'accélération usuels
- Annexe 5 : Comparaison de la mise en œuvre de différents types d'essais de fiabilité
- Annexe 6 : Illustrations de la mise en œuvre de modèles paramétriques
- Annexe 7 : Modélisation de durée de vie de systèmes d'une station-service hydrogène à l'aide de modèles physiques déterministes
- Annexe 8 : Calcul de la probabilité de fuite d'une tuyauterie au moyen de la pondération bayésienne du jugement d'experts par des données de retour d'expérience

Annexe 1 : Lois de probabilités usuelles

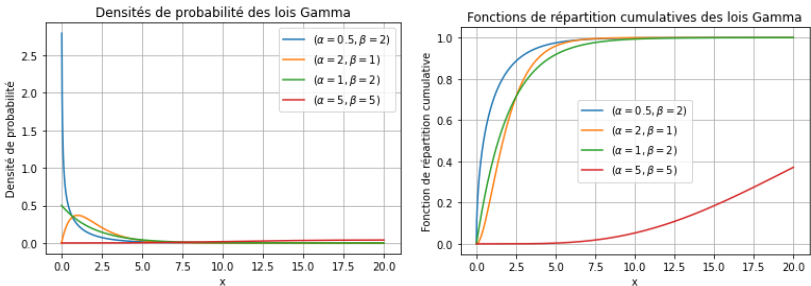
1. Loi uniforme

Support	$[a,b]$
Densité de probabilité	$f(t) = \frac{1}{b-a}$
Fonction de répartition	$F(t) = \frac{t-a}{b-a}$
Paramètres	$a, b \in \mathbb{R}$
Moyenne	$E[T] = \frac{b+a}{2}$
Variance	$V[T] = \frac{(b-a)^2}{12}$
Utilisation de la loi	Modéliser la connaissance a priori non informative
Graphiques	 The figure contains two side-by-side plots for a uniform distribution with parameters $a = 1e-05$ and $b = 0.0001$. Left Plot: Densité de probabilité de la loi uniforme The y-axis is labeled 'Densité de probabilité' and ranges from 0 to 12000. The x-axis is labeled 'x' and ranges from 0.00000 to 0.00010. A horizontal blue line at $y = 10000$ represents the constant probability density. Vertical dashed red and green lines mark the boundaries a and b respectively. The area under the line is shaded light blue. Right Plot: Fonction de répartition (CDF) de la loi uniforme The y-axis is labeled 'Fonction de répartition (CDF)' and ranges from 0.0 to 1.0. The x-axis is labeled 'x' and ranges from 0.00000 to 0.00010. A blue line starts at $(a, 0)$ and increases linearly to $(b, 1)$. Vertical dashed red and green lines mark the boundaries a and b respectively.

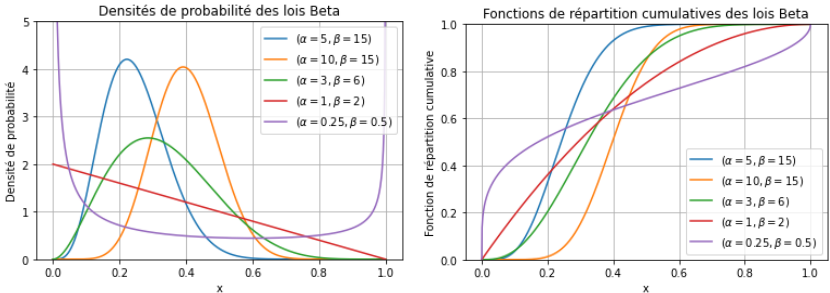
2. Loi exponentielle

Support	$\mathbb{R}^+$
Densité de probabilité	$f(t) = \lambda \times e^{-\lambda t}$
Fonction de répartition	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
Paramètre	$\lambda > 0$
Moyenne	$E[T] = \frac{1}{\lambda}$
Variance	$V[T] = \frac{1}{\lambda^2}$
Utilisation de la loi	Modéliser la fiabilité de composants pendant leur phase de maturité (taux de défaillance constant)
Graphiques	

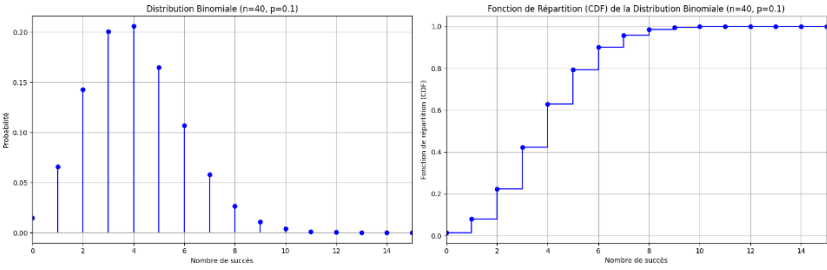
3. Loi Gamma

Support	$t \in \mathbb{R}^+$
Densité de probabilité	$f(t) = \frac{t^{a-1}b^a}{\Gamma(a)}e^{-bt}$ $\Gamma(a) = \int_0^{+\infty} t^{a-1}e^{-t}dt$
Fonction de répartition	$F(t) = \Gamma_I(tb;a)$ Γ_I , la fonction Gamma incomplète
Paramètres	$a, b > 0$ a est parfois assimilé au nombre de défaillances et b au temps de défaillance
Moyenne	$E[T] = \frac{a}{b}$
Variance	$V(t) = \frac{a}{b^2}$
Utilisation de la loi	Modéliser la connaissance a priori lors de l'inférence bayésienne
Graphiques	

4. Loi Beta

Support	$x \in]0;1[$
Densité de probabilité	$P(X = a) = \frac{1}{B(a,b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1}$ $B(a,b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)}$
Fonction de répartition	$F(t) = \frac{B(a,b)}{B_x(a,b)}$ $B_x(a,b) = \int_0^x u^{a-1} (1-u)^{b-1} du$
Paramètres	$a, b > 0$
Moyenne	$E[X] = \frac{a}{a+b}$
Variance	$V[X] = \frac{ab}{(a+b+1)(a+b)^2}$
Utilisation de la loi	Modéliser la connaissance a priori lors de l'inférence bayésienne
Graphiques	

5. Loi binomiale

Support	$k \in \{0, \dots, n\}$
Densité de probabilité	$f(k) = P(K = k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}$ $q = 1 - p$
Fonction de répartition	$F(k) = \sum_{i=0}^k \binom{n}{i} p^i q^{n-i}$
Paramètres	$n \in \mathbb{N}; p \in [0, 1]; k \in \{0, \dots, n\}$
Moyenne	$E[K] = np$
Variance	$V[K] = npq$
Utilisation de la loi	Modéliser la probabilité de réussite ou d'échec à la sollicitation
Graphiques	

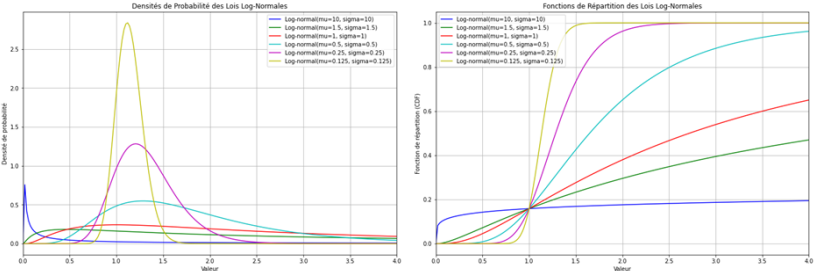
6. Loi Weibull

Support	$t \in \mathbb{R}^+$
Densité de probabilité	$f(t; k, \lambda, \theta) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{t - \theta}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{t - \theta}{\lambda} \right)^k}$
Fonction de répartition	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t - \theta}{\lambda} \right)^k}$
Paramètres	$\theta, k, \lambda > 0$ λ est le paramètre d'échelle, k est le paramètre de forme et θ est le paramètre de position
Moyenne	$E[T] = \theta + \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$
Variance	$V[T] = \lambda^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right)^2 \right]$
Utilisation de la loi	Modéliser les différentes phases de jeunesse, maturité et vieillissement d'un système
Graphiques	The figure contains three subplots illustrating the Weibull distribution for different parameter sets: $\lambda=0.5, k=0.5$ (blue), $\lambda=1, k=1$ (orange), $\lambda=1.5, k=1.5$ (green), and $\lambda=3, k=3$ (red). Densités de probabilité des lois de Weibull: Shows the probability density function $f(t)$ for $t \in [0, 6]$. The curves show different shapes: a decreasing curve for $k=0.5$, an increasing curve for $k=1$, and a bathtub-shaped curve for $k=1.5$ and $k=3$. Fonctions de répartition des lois de Weibull: Shows the cumulative distribution function $F(t)$ for $t \in [0, 6]$. The curves start at (0,0) and approach 1.0 as t increases. Taux de défaillance des lois de Weibull: Shows the hazard rate function $h(t)$ for $t \in [0, 6]$. The curves show different failure rates: a decreasing curve for $k=0.5$, a constant curve for $k=1$, and an increasing curve for $k=1.5$ and $k=3$.

7. Loi Normale

Support	$\mathbb{R}$
Densité de probabilité	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}$
Fonction de répartition	$F(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t-\mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right)$ $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$
Paramètres	$\mu \in \mathbb{R}$ $\sigma > 0$
Moyenne	$E[T] = \mu$
Variance	$V(t) = \sigma^2$
Utilisation de la loi	Modéliser une connaissance a priori informative
Graphiques	

8. Loi Log-Normale

Support	$]0; +\infty[$
Densité de probabilité	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}$
Fonction de répartition	$F(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right)$ $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$
Paramètres	$\mu \in \mathbb{R}$ $\sigma > 0$
Moyenne	$E[T] = \mu$
Variance	$V(t) = \sigma^2$
Utilisation de la loi	Modéliser une connaissance a priori informative
Graphiques	 The figure consists of two side-by-side plots. The left plot, titled 'Densités de Probabilité des Lois Log-Normales', shows the probability density function (PDF) for six different Log-Normal distributions. The x-axis is labeled 'Valeur' and ranges from 0.0 to 4.0. The y-axis is labeled 'Densité de probabilité' and ranges from 0.0 to 2.5. The curves are: a blue curve (mu=0.5, sigma=0.5) peaking at x=0.5; a green curve (mu=1.5, sigma=1.5) peaking at x=1.5; a red curve (mu=1.5, sigma=1) peaking at x=1.5; a cyan curve (mu=0.5, sigma=0.5) peaking at x=0.5; a magenta curve (mu=2.5, sigma=0.25) peaking at x=2.5; and a yellow curve (mu=1.25, sigma=0.125) peaking at x=1.25. The right plot, titled 'Fonctions de Répartition des Lois Log-Normales', shows the cumulative distribution function (CDF) for the same six distributions. The x-axis is labeled 'Valeur' and ranges from 0.0 to 4.0. The y-axis is labeled 'Fonction de répartition (CDF)' and ranges from 0.0 to 1.0. The curves start at (0,0) and approach 1.0 as x increases, with the rate of increase depending on the parameters.

Annexe 2 : Définitions de concepts en lien avec la maîtrise du vieillissement

Un certain nombre de termes et de définitions des termes intervenant dans la maîtrise du vieillissement sont repris ci-dessous du document Ineris (Ineris, 2009), sur la base de documents tels que (NF EN 13306), (Guides UIC / UFIP DT32 et DT84).

Gestion du vieillissement : mesures d'ordre technique, d'exploitation ou de maintenance, visant à maintenir, dans les limites acceptables la dégradation par vieillissement.

Inspection en service : examen ou contrôle de l'intégrité d'un système, structure ou composant pendant l'exploitation ou l'arrêt.

Le guide DT84 rappelle la définition : il s'agit d'un *"Ensemble prédéterminé de dispositions à mettre en œuvre, en service ou à l'arrêt, pour assurer la maîtrise de l'état d'un équipement ou d'un groupe d'équipements dans les conditions de sécurité requises"*.

A ne pas confondre avec "inspection périodique" et "inspection de requalification" au sens réglementaire de l'arrêté du 15 mars 2000 modifié

Plan d'inspection : le guide DT84 (UIC / UFIP, 2010) rappelle la définition : *"Document qui définit l'ensemble des opérations prescrites par le Service Inspection pour assurer la maîtrise, l'état et la conformité dans le temps d'un équipement sous pression ou d'un groupe d'équipements sous pression soumis à surveillance"*.

Maintenance : ensemble des actions directes ou indirectes qui permettent de déceler, d'éviter ou d'atténuer la dégradation d'un système, structure ou composant en fonctionnement ; ou de rétablir à un niveau acceptable l'aptitude d'un système, structure ou composant défaillant à remplir les fonctions nominales.

Critères d'acceptabilité : limite spécifique d'un indicateur fonctionnel ou d'état, utilisée pour évaluer l'aptitude d'un système, structure ou composant à remplir la fonction pour laquelle il est conçu.

Contrôle Non Destructif (CND) : On regroupe sous le vocable **essais non destructifs** ou encore **contrôles non destructifs** (ce dernier évoquant mieux l'aspect qualité industrielle que le premier qui évoque plutôt les examens en laboratoire) l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la **santé** d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des **altérations préjudiciables** à leur utilisation ultérieure. Le terme de santé, s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide au diagnostic médical, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des contrôles non destructifs qui est la mise en évidence de toutes les **défectuosités** susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et / ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné. En ce sens, le contrôle non destructif (**CND**) apparaît comme un élément majeur du **contrôle de l'intégrité** des équipements.

Conditions de service : ce sont les conditions **réelles qui ont un impact** sur le système, la structure ou le composant (conditions normales, transitoires d'exploitation, erreurs, conditions accidentelles).

Le guide DT84 (UIC / UFIP, 2010) définit les conditions de service comme *"Les conditions de service comportant les **conditions normales d'exploitation** y compris les phases de démarrage, d'arrêt, de remise en service et les transitoires"*.

Défaillance : inaptitude ou interruption de l'aptitude d'un système, structure ou composant à fonctionner dans les limites des critères d'acceptabilité.

- **Défaillance catalectique** : défaillance soudaine et imprévisible, c'est-à-dire relatif à un défaut ou une dégradation ne pouvant pas être détecté en amont ou bien soumis à une sollicitation hors domaine de conception. Plus d'information est disponible au paragraphe 2.1.3.1.

Dégradation : détérioration immédiate ou graduelle d'un système, structure ou composant qui pourrait altérer son aptitude à fonctionner dans les limites d'acceptabilité ; si elle est progressive, alors il y a vieillissement ; elle est engendrée par les conditions de service.

Mécanismes de vieillissement ou de dégradation : processus spécifique qui modifie graduellement les caractéristiques d'un système, structure ou composant avec le temps ou l'utilisation.

Effet du vieillissement : modifications nettes des caractéristiques d'un système, structure ou composant qui se produisent avec le temps ou l'utilisation et qui sont dues aux mécanismes de vieillissement.

Conditions opératoires Critiques Limites (COCL) : seuil fixé à un paramètre physique ou chimique (température, pH, vitesse de fluide, concentration d'un contaminant) qui, s'il est dépassé, peut avoir un impact notable sur le comportement, sur l'état ou l'endommagement de l'équipement, ou peut entraîner l'apparition d'un nouveau phénomène de dégradation.

Obsolescence : en économie, l'obsolescence est le fait pour un produit d'être périmé, et donc de perdre toute valeur, du simple fait de l'évolution technique ou de la mode, même si le produit est en parfait état de fonctionnement. D'un autre côté, certaines entreprises fabriquent des produits dont l'obsolescence est dite « programmée », parce qu'elle survient à un moment déterminé dans la vie de ce produit de par sa conception ou sa fabrication même. Ces produits sont généralement conçus de manière à ce que certains de leurs composants vitaux, lorsqu'ils tombent en panne ou deviennent obsolètes, aient un coût de changement supérieur à la valeur marchande d'un équipement équivalent neuf, rendant leur remplacement sans intérêt pour le consommateur. De plus, les fabricants s'arrangent souvent pour que les normes permettant l'assemblage des pièces constituant ces appareils changent dans un délai inférieur à la durée nominale de fonctionnement des organes vitaux, toujours dans la même optique de renouvellement forcé du parc.

Annexe 3 : Définitions des principaux modes de détérioration

La liste des détériorations potentielles générées par les mécanismes est longue et variable selon les matériaux et les systèmes considérés. Sans exhaustivité, cette annexe présente une liste de définitions des principaux mécanismes de dégradation des structures, des composants mécaniques et des composants électriques et électroniques (Safelife, 2015) (IMdR, 2024).

Mécanismes de dégradation des structures et des composants mécaniques :

L'ALTERATION

L'altération est l'usure naturelle des matériaux (généralement des roches et des sols) causée par l'interaction avec les éléments de l'environnement. La chaleur, le froid, l'eau et l'oxygène sont des forces communes de l'altération. Il ne faut donc pas la confondre avec l'érosion, qui implique le déplacement ou le transport de matériaux. L'usure des matériaux peut être physique ou chimique.

L'EROSION

L'érosion est l'élimination de la surface d'un matériau par abrasion. Des particules dures heurtent la surface, provoquant une usure superficielle qui entraîne une perte de matériau. Elle dépend principalement de la différence de dureté entre le matériau et les particules d'impact, ainsi que de la vitesse et de l'angle d'impact. L'érosion est souvent observée dans les systèmes où des solides sont transportés. En outre, l'érosion peut être causée par l'impact de particules liquides.

L'ECAILLAGE

L'écaillage est un processus physique de décomposition des couches superficielles d'un type de matériau. La séparation peut être causée par de nombreux facteurs différents, notamment le processus naturel d'altération, l'augmentation et la diminution cycliques de la température, le feu, les produits chimiques, le dépôt de sel, la corrosion, le frottement continu ou un impact direct avec un autre objet. De nombreux matériaux utilisés dans les machines sont sujets à un certain degré d'écaillage, de même que de nombreux types de matériaux de construction.

LA FISSURATION

La fissure est un défaut ou une discontinuité brutale apparue ou apparaissant dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, où la matière est séparée sur une certaine surface. Des fissures peuvent se produire dans un certain nombre de matériaux tels que les métaux, les composites, les plastiques et les minéraux. Lorsque les dommages causés par les matériaux, tels que les microfissures et les vides, prennent de l'ampleur et se localisent, il en résulte une fissure macroscopique. De nombreux matériaux de construction se contractent et se dilatent en fonction des changements de température ou d'humidité, et se déforment en fonction des conditions de charge et de support. Des fissures peuvent apparaître lorsque la conception et la construction ne prévoient pas de tenir compte de ces mouvements. Lorsqu'une fissure préexistante dans un matériau devient soudainement instable et se développe rapidement à travers le matériau, une rupture rapide se produit. Il s'agit d'une défaillance catastrophique qui se produit sans avertissement. Les deux défaillances les plus courantes qui se produisent sans avertissement sont la rupture rapide et la fatigue.

LA FATIGUE

La fatigue est le dommage structurel progressif et localisé qui se produit lorsqu'un matériau est soumis à une charge cyclique. Les valeurs maximales nominales de la contrainte sont inférieures à la limite de résistance à la traction et peuvent être inférieures à la limite d'élasticité du matériau. La fatigue se produit lorsqu'un matériau est soumis à des charges et décharges répétées. Si les charges dépassent un certain seuil, des fissures microscopiques commencent à se former au niveau des concentrateurs de contraintes tels que la surface, les bandes de glissement persistantes (PSB) et les interfaces entre les grains. Une fissure finit par atteindre une taille critique et la structure se rompt soudainement. La fatigue peut être liée à des charges mécaniques ou thermiques.

LE FLUAGE

Le fluage (parfois appelé écoulement à froid) est la déformation plastique progressive (permanente) d'un matériau solide sous l'influence de contraintes mécaniques. Il peut se produire à la suite d'une exposition à long terme à des niveaux élevés de contrainte qui restent inférieurs à la limite d'élasticité du matériau. Le fluage est plus important dans les matériaux qui sont soumis à la chaleur pendant de longues périodes, et il augmente généralement à mesure qu'ils approchent de leur point de fusion.

Le fluage peut réduire l'endommagement causé par la fatigue à des structure du fait de la relaxation de contrainte.

LA CORROSION

La corrosion est la dégradation physique d'un matériau due aux réactions chimiques qui se produisent à sa surface avec un oxydant. Elle touche toutes sortes de matériaux (métaux, céramiques, polymères) dans des environnements variables (milieux aqueux, atmosphère, haute températures...). Les matériaux appelés « alliages résistants à la corrosion » (ARC) sont moins sensibles mais ne sont pas immunisés.

En fonction de l'environnement dans lequel se déroulent les réactions de corrosion, celles-ci peuvent être classées en corrosion humide et en corrosion sèche :

- La corrosion humide (aqueuse) est la forme la plus couramment rencontrée ; en raison de la nature électrochimique de ce mécanisme, elle se produit si de l'eau est présente dans l'environnement (ainsi que de l'eau présente sous forme de vapeur dans l'atmosphère).
- La corrosion sèche se produit en l'absence d'eau. Elle se produit généralement à des températures supérieures à 400°C, lorsqu'il y a oxydation chimique directe du métal de surface en son oxyde métallique en présence d'oxygène.

La corrosion peut se combiner avec les effets mécaniques et donner de la corrosion sous contrainte et de la fatigue-corrosion ; de même, elle intervient dans certaines formes d'usure des surfaces dont les causes sont à la fois physicochimiques et mécaniques. On distingue notamment la corrosion à haute température (température > 500°C), la corrosion sous contrainte (cf. paragraphe dédié) et la fatigue-corrosion (action conjuguée de l'environnement et d'une sollicitation mécanique cyclique).

LA FRAGILISATION

La fragilisation est une perte de ductilité d'un matériau.

Selon le matériau concerné, on peut distinguer :

- La fragilisation par l'hydrogène est le processus par lequel divers métaux, en particulier l'acier à haute résistance, deviennent cassants et se fracturent à la suite d'une exposition à l'hydrogène. La fragilisation par l'hydrogène résulte souvent de l'introduction involontaire d'hydrogène dans des métaux sensibles au cours d'opérations de formage ou de finition telles que le traitement thermique, la carbonisation, le nettoyage, le décapage et, dans l'environnement de service, à la suite de réactions de protection cathodique ou de réactions de corrosion. L'hydrogène peut également être introduit au cours de la fabrication, par exemple lors du formage par laminage, de l'usinage et du perçage en raison de la dégradation de lubrifiants inadaptés, ainsi qu'au cours des opérations de soudage ou de brasage.
- La fragilisation du métal solide (SME) se produit en dessous du point de fusion de l'espèce fragilisante, des éléments tels que le zinc, le cadmium et le mercure étant adsorbés de manière atomique à la surface des aciers ferritiques / austénitiques (et également de l'aluminium dans le cas du mercure).
- La fragilisation par le rayonnement (NRE). Dans les centrales nucléaires, en raison de l'irradiation provenant du cœur, les réservoirs sous pression du réacteur subissent une lente dégradation de leurs propriétés mécaniques.
- D'autres phénomènes spécifiques à chaque matériau sont possibles comme par exemple la fragilisation des matériaux plastiques par rayonnement UV...

FISSURATION PAR CORROSION SOUS CONTRAINTE

La fissuration dans certaines conditions de contrainte et de dégradations combinées peut être rapidement critique. En fonction du mécanisme, elles peuvent être classées comme suit :

- Fissuration par corrosion sous contrainte : La fissuration par corrosion sous contrainte (SCC) est observée sur les aciers inoxydables austénitiques sensibles dans certains environnements. La fissuration par corrosion sous contrainte se produit généralement dans des environnements contenant du chlorure, pour que la fissuration par corrosion sous contrainte se produise, le matériau doit être soumis à une contrainte.
- Fissuration induite par l'hydrogène (HIC) : Souvent rencontrée dans les environnements acides. La présence de H₂S empêche la formation de gaz H₂ à partir des atomes d'hydrogène produits par la réaction de corrosion. Au lieu de cela, les atomes d'hydrogène peuvent pénétrer dans la structure de l'acier. Les atomes d'hydrogène s'accumulent dans de petits vides et inclusions à l'intérieur de l'acier où ils se combinent pour former du gaz H₂. La pression du gaz H₂ dans ces

poches augmente au fur et à mesure que les atomes d'hydrogène se combinent et peut devenir extrêmement importante, entraînant la formation de fissures dans la structure de l'acier.

- Fatigue par corrosion : La fatigue due à la corrosion est l'augmentation du taux de croissance des fissures dans un environnement corrosif par rapport à ce qui serait attendu dans un environnement sec de fatigue purement mécanique. Les sources de fatigue comprennent les vibrations ainsi que la dilatation et la contraction associées au cycle thermique de l'équipement.

LE FRETTEMENT

Le terme fretting ou « usure de contact » décrit les phénomènes physiques particuliers d'usure, déformation, oxydation, corrosion, fissuration, adhésion ou autres modifications physico-chimiques, électrochimiques et structurelles de la matière quand deux surfaces en contact (de même nature ou non) sont soumises à des mouvements oscillatoires d'amplitude inférieure à la taille du contact. Cette sollicitation est généralement induite par des vibrations ou des déformations relatives de pièces qui imposent des déplacements relatifs de très faible amplitude entre les faces en contact d'éléments assemblés (frettés, boulonnés, rivetés, ...).

Selon les amplitudes de débattement l'endommagement prédominant sera l'usure, l'apparition de fissure dans le matériau ou bien une combinaison des deux mécanismes.

L'USURE

Dans la science des matériaux, l'usure des surfaces désigne le phénomène de détérioration des couches superficielles d'un solide sous l'action mécanique du milieu extérieur. On distingue différents types d'usure mécaniques :

- usure par corrosion : Une surface est dite oxydée lorsque l'on peut enlever des particules par un simple toucher ou provoquer une oxydation sur la surface frottée par simple contact physique. Un cas particulier est le phénomène de frittage corrosif : les points de contact entre deux surfaces comprimées se soudent, puis lors d'un mouvement, des particules microscopiques se détachent et deviennent abrasives par frottement et élévation de température.
- usure par adhérence : Entre deux surfaces en contact et en mouvement l'une par rapport à l'autre, des particules dures (provenant de l'une ou l'autre des surfaces ou de l'extérieur) qui s'imprègnent dans la surface la plus tendre rayent celle plus dure, qu'elles soient lubrifiées ou non. Cette usure se produit par éraillure, choc ou érosion. Pour éviter ce phénomène abrasif (grippage), les surfaces doivent subir un traitement augmentant la dureté superficielle.
- usure par laminage : Appelée aussi fatigue superficielle, elle est produite par des sollicitations périodiques dues au laminage (contact de Hertz) entre deux surfaces en contact. Ces contraintes provoquent des criques qui peuvent se produire en surface ou sous la couche de surface. Ces criques peuvent être accentuées par hydrogène ou l'eau contenus dans les lubrifiants ou par le lubrifiant même, quand sa viscosité lui permet de pénétrer à l'intérieur des criques. Dans le cas d'une pièce cémentée irrégulièrement, il peut se produire un phénomène d'écaillage superficiel à la suite de la formation de craque (cas des cages de roulement à billes).

LE MATAGE

Le matage est une déformation plastique localisée de la matière sous l'effet d'un choc ou d'une pression élevée.

LA FATIGUE VIBRATOIRE

Les processus de fatigue vibratoires, parfois confondus avec les processus de fatigue classique s'initient également par l'application répétée de contraintes mécaniques, qui génèrent des déformations élastiques récurrentes, mais dont la contrainte correspond à une vibration.

Au fil du temps, ces déformations peuvent alors entraîner la formation de microfissures ou de défauts au sein des matériaux, dont sont constituées les structures concernées. Ces micros-défauts servent

alors de points d'amorçage pour des mécanismes de propagation de fissures, qui se développent progressivement à chaque cycle de contrainte.

Mécanismes de dégradation des composants électriques et électroniques :

FATIGUE VIBRATOIRE

La fatigue vibratoire est un phénomène courant dans le domaine des composants électroniques, et elle se manifeste par la détérioration progressive des matériaux en raison de contraintes mécaniques répétées. Ce phénomène résulte principalement de vibrations continues ou de cycles répétitifs de contraintes mécaniques auxquels sont soumis les composants électroniques, tels que les puces, les connecteurs et les cartes de circuits imprimés.

Au fil du temps, ces déformations peuvent entraîner la formation de microfissures ou de défauts au sein des matériaux. Ces micro-défauts servent alors de points d'amorçage pour des mécanismes de propagation de fissures, qui se développent progressivement à chaque cycle de contrainte.

CORROSION ÉLECTROCHIMIQUE

Les composants électroniques sont souvent exposés à des environnements corrosifs, tels que des conditions humides ou des atmosphères agressives. La corrosion électrochimique peut entraîner la détérioration des contacts métalliques, des soudures et des pistes conductrices, affectant ainsi la conductivité électrique et pouvant conduire à des défaillances.

FATIGUE PAR CYCLES THERMIQUES

Les variations de température fréquentes peuvent causer des contraintes thermiques importantes. Lorsque les composants passent par des cycles de chauffage et de refroidissement, les différences de dilatation thermique entre les matériaux peuvent provoquer des contraintes mécaniques, conduisant à des microfissures, des décollements de couches et des défaillances structurelles.

EFFET WHISKER

Certains matériaux, tels que l'étain, peuvent développer des "whiskers" (filaments minces) au fil du temps. Ces whiskers peuvent croître à partir des surfaces des composants, provoquant des courts-circuits entre les pistes voisines et entraînant des défaillances.

RAYONNEMENT IONISANT

Les composants électroniques peuvent être endommagés par l'exposition à des radiations ionisantes, telles que les rayons gamma ou les particules alpha. Cela peut entraîner des changements dans les propriétés électriques des matériaux, des altérations de la structure cristalline, voire des défaillances des dispositifs électroniques.

ELECTROMIGRATION

Le transport d'ions métalliques sous l'influence d'un courant électrique peut provoquer la migration des matériaux, entraînant des courts-circuits ou des interruptions dans les connexions métalliques.

DÉTÉRIORATION DES MATÉRIAUX POLYMÈRES

Les cartes électroniques contiennent souvent des matériaux polymères, tels que les substrats des circuits imprimés. L'exposition à des facteurs environnementaux tels que l'humidité, la chaleur et les produits chimiques peut provoquer la détérioration des polymères, affectant la stabilité mécanique et les propriétés diélectriques.

DÉCHARGES ÉLECTROSTATIQUES (ESD)

Les décharges électrostatiques soudaines peuvent endommager les composants électroniques sensibles. Les dispositifs de protection ESD sont souvent utilisés pour minimiser les risques liés à ces événements.

Annexe 4 : Modèles d'accélération usuels

1. Le modèle d'Arrhénius

Il s'agit d'un modèle souvent utilisé lorsque les mécanismes de dégradation dépendent de la température, en particulier : diélectrique, semi-conducteur, batterie, lubrifiant, graisse, plastique, filament de lampe incandescente).

$$\tau = Ae^{\left(\frac{E_a}{kT}\right)}$$

Avec :

- A : une constante propre à l'essai à estimer à partir des résultats d'essais ;
- T : la température absolue en K ;
- E_a : l'énergie d'activation en eV. Elle dépend du matériau et des mécanismes d'endommagement et varie entre 0,4 et 0,7 eV ;
- k : la constante de Boltzmann $k = 8,6171 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$.

Le facteur d'accélération FA entre la durée de vie τ_1 pour une température T_1 et une durée de vie τ_2 pour une température T_2 est :

$$FA = \frac{\tau_1}{\tau_2} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

Pour les composants électriques, la prise en compte des mécanismes de défaillance activés par le fonctionnement électrique des composants se fait en prenant en compte la dissipation thermique et en ajoutant dans le modèle le ratio de la tension d'utilisation sur la tension nominale, le facteur d'accélération devient alors :

$$FA = \left(\frac{1}{S_{ref}} \frac{V_a}{V_n} \right)^p e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

Avec :

- V_a la tension d'utilisation ;
- V_n la tension nominale ;
- S_{ref} le niveau de référence pour la contrainte électrique (stress) ;
- p la puissance accélératrice pour la contrainte électrique

2. Modèle puissance inverse

Ce modèle est utilisé lorsque le mécanisme d'endommagement est sensible à un stress particulier (diélectrique, roulement à billes, composants optoélectroniques, composants mécaniques soumis à la fatigue, filament de lampe incandescente). Le modèle de puissance inverse décrit la cinétique d'une dégradation sous stress constant :

$$FA = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma$$

Avec :

- V_1 et V_2 les niveaux de stress ;
- γ une constante dépendante de l'essai et de la défaillance.

3. Modèle Coffin-Manson

Le modèle de Coffin-Manson est applicable aux composants soumis à la fatigue avec une variation de la température. Le nombre moyen de cycle est calculé comme suivant :

$$N(T) = \frac{A}{T^B}$$

Avec :

- T la température ;
- A et B des constantes caractéristiques des pièces et de leurs défaillances.

4. Modèle d'Eyring généralisé

Ce modèle est utilisé lorsque le mécanisme d'endommagement est sensible à la température et un autre stress (composant diélectrique, conducteur aluminium, composant mécanique soumis à la rupture).

$$\tau = \frac{A}{T} e^{\frac{B}{kT}} e^{V\left(C + \frac{D}{kT}\right)}$$

Avec :

- T la température absolue en °K ;
- V un stress quelconque ;
- k la constante de Boltzmann $k = 8,6171 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$;
- A, B, C et D des constantes dépendantes de la défaillance et de l'essai.

5. Modèle de Peck

Ce modèle est utilisé pour modéliser l'accélération du couple taux d'humidité-température. Le facteur d'accélération est le suivant :

$$FA = \left(\frac{RH_a}{RH_0}\right)^p e^{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$$

Avec :

- RH_a le taux d'humidité de l'environnement considéré ;
- RH_0 le taux d'humidité de référence ;
- E_a l'énergie d'activation en eV. Elle dépend du matériau et des mécanismes d'endommagement et varie entre 0,4 et 0,7 eV ;
- k la constante de Boltzmann $k = 8,6171 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$;
- p la puissance accélératrice pour cette contrainte ;
- T_1 et T_2 les températures absolues de référence et de l'environnement considéré en K.

Le guide FIDES apporte des informations complémentaires sur l'obtention des valeurs de taux d'humidité.

6. Modèle de Norris-Landzberg

Ce modèle est utilisé pour modéliser l'accélération apportée par les variations thermique sur le mécanisme de fatigue. Il est dérivé du modèle Coffin-Manson habituellement utilisé pour la fatigue thermomécanique. Il tient du fait que plus les cycles thermiques sont lents, plus ils sont endommageant à cause du fluage.

Le modèle ici présenté est issu du guide FIDES, il a été modifié pour transformer la prédiction du modèle en facteur d'accélération applicable à un taux de défaillance.

$$FA = \left(\frac{24}{N_0} \times \frac{N_{ca}}{t_a}\right) \times \left(\frac{\min(\theta_c, 2)}{\min(\theta_0, 2)}\right)^p \times \left(\frac{\Delta T_c}{\Delta T_0}\right)^m \times e^{\frac{E_a}{k}\left[\frac{1}{T_0 + \Delta T_0} - \frac{1}{T_{mc}}\right]}$$

Avec,

- N_{ca} nombre de cycles annuel ;
- N_0 nombre de cycle de référence ;
- t_a durée annuelle de la phase ;
- θ_c durée du cycle en heures ;
- θ_0 durée du cycle de référence ;
- ΔT_c amplitude thermique du cycle ;

- E_a Energie d'activation égale à 0,122 eV ;
- k constante de Boltzmann égale à $8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K ;
- T_{mc} température maximale atteinte pendant le cycle ;
- T_0 température de référence ;
- m coefficient de fatigue, par exemple $m=1.9$ pour des brasures SnPb ;
- p égale à $1/3$, puissance accélératrice du facteur de durée.

7. Courbe de Wholer et modèles associés

La courbe de Wöhler ou courbe de fatigue donne la variation de la contrainte appliquée σ_a en fonction du nombre de cycles à la rupture N pour une contrainte moyenne fixe. La courbe peut être décomposée en trois domaines de fatigue en fonction du nombre de cycles : la fatigue oligo-cyclique, la fatigue limitée et la fatigue illimitée. On trouve dans littérature de nombreux modèles modélisant la courbe de Wöhler, la thèse XX (TEBBI) cite les suivants :

Nom du modèle	Domaines modélisés	Equation
Basquin	Endurance limitée	$N\sigma_a^B = A$
Strömeyer	Endurance limitée et illimitée	$\sigma_a = \sigma_D + \left(\frac{A}{N}\right)^B$
Bastenaire	Fatigue oligo--cyclique, endurance limitée et illimitée	$(N + B)(\sigma_a - \sigma_D)e^{A(\sigma_a - \sigma_D)} = C$

Avec :

- A, B et C des paramètres dépendant du matériaux et des conditions d'essai ;
- σ_a la contrainte appliquée ;
- σ_D la limite de fatigue ;
- N le nombre de cycles.

8. Autres modèles

D'autres modèles ont été identifiés dans la littérature pour modéliser l'endommagement causé par la température :

- le modèle de Berthelot : $t = A.e^{C.T}$
- le modèle de Williams, Landels et Ferry : $t = A.e^{-a/(T+b)}$

Annexe 5 : Comparaison de la mise en œuvre de différents types d'essais de fiabilité

Dans le but de comparer l'intérêt et l'efficacité des essais classiques, bayésiens et accélérés, nous proposons dans ce paragraphe de calculer les durées d'essais nécessaires pour démontrer la fiabilité d'un composant.

Nous posons l'hypothèse d'une loi de mortalité exponentielle de paramètre $\lambda = 10^{-4}/h$.

Si on considère un échantillon de n composants, r défaillances sont observées sur une durée d'essais T . La durée cumulée de fonctionnement est donc égale à $t_c = n \times T$.

A partir d'un échantillon de taille $n = 20$, nous cherchons à déterminer la durée d'essais T pour laquelle, si aucune défaillance n'est observée ($r = 0$), le taux de défaillance $\lambda = 10^{-4}/h$ peut être garanti avec un taux $1 - \alpha = 95\%$.

1. Essai classique

On réalise un plan d'essais censurés de type I et dans le cas où l'on observe 0 défaillance, on utilise un intervalle de confiance unilatéral.

L'estimateur sans biais de λ est calculé comme suivant ;

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{n \times T}$$

Et la borne supérieure de l'intervalle de confiance unilatéral à gauche est donné par :

$$\hat{\lambda}_{max} = \frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r+2)}{2nT}$$

On a donc T :

$$T = \frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r+2)}{2n\hat{\lambda}_{max}} = \frac{\chi^2_{95\%}(2)}{4 \cdot 10^{-3}} = 1498 \text{ heures}$$

2. Essai bayésien sans connaissance

On prend comme loi non-informative, une loi uniforme définie sur $[0; +\infty]$.

L'estimation ponctuelle du paramètre λ est donnée par :

$$\hat{\lambda} = \frac{r+1}{n \times T}$$

Et l'intervalle de confiance unilatéral à gauche de λ est donné par l'équation :

$$1 - \alpha = \int_0^{\hat{\lambda}_{max}} \frac{(nT)^{r+1}}{\Gamma(r+1)} \lambda^r e^{-nT\lambda} d\lambda$$

A l'aide d'un changement de variable, on se ramène au calcul du quantile d'une loi de Chi-deux et la borne supérieure de l'intervalle de crédibilité est :

$$\hat{\lambda}_{max} = \frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r+2)}{2nT}$$

On retrouve donc le même résultat que pour l'essai classique $T = 1498 \text{ heures}$.

3. Essai bayésien avec connaissance correcte

Des experts estiment l'intervalle de confiance à 95% du taux de défaillance λ comment étant $[5 \cdot 10^{-5}; 10^{-4}] \text{ panne/h}$.

On modélise cette connaissance avec une loi $\text{Gamma}(a = 27, b = 36.10^4)$

Nous cherchons la durée T de l'essai. Via la loi du Chi-deux, nous trouvons :

$$T = \frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r + a)}{2n\hat{\lambda}_{\max}} - \frac{b}{n} = \frac{\chi^2_{1-5\%}(2 \times 0 + 27)}{2 \times 20 \times 10^{-4}} - \frac{36.10^4}{20} = 38 \text{ heures}$$

4. Essai bayésien avec connaissance incorrecte

Cette fois-ci, les experts fournissent l'intervalle suivant : $[5.10^{-5}; 2.10^{-4}]$ panne/h.

On modélise cette connaissance avec une loi $\text{Gamma}(a = 8, b = 66667)$

Et nous cherchons à nouveau la durée T de l'essai. Via la loi du Chi-deux, nous trouvons :

$$T = \frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r + a)}{2n\hat{\lambda}_{\max}} - \frac{b}{n} = \frac{\chi^2_{1-5\%}(2 \times 0 + 8)}{2 \times 20 \times 10^{-4}} - \frac{66667}{20} = 3456 \text{ heures}$$

5. Essais accélérés

Nous effectuons des essais accélérés en température et utilisons la loi d'Arrhenius pour modéliser le facteur d'accélération.

$$FA = \frac{\tau_N}{\tau_A} = e^{\frac{E_a}{k}(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T_A})}$$

Avec,

- τ_N la durée de vie moyenne du composant en conditions normales ;
- τ_A la durée de vie moyenne du composant en conditions accélérées ;
- E_a l'énergie d'activation, $E_a = 0,5 \text{ eV}$;
- k la constante de Boltzmann $k = 8,616.10^{-5} \text{ eV/K}$;
- T_N la température absolue en °K en conditions normales, ici 20°C ;
- T_A la température absolue en °K en conditions accélérées, ici 100°C.

On a donc,

$$FA = e^{\frac{0,5}{8,616.10^{-5}}(\frac{1}{273+20} - \frac{1}{273+100})} \approx 70$$

et

$$\tau_A = \frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r + 2)}{2n\hat{\lambda}_{\max}FA} = 21 \text{ heures}$$

6. Conclusions

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats des durées théoriques calculées pour chaque type d'essais.

Essai classique	$T = 1498 \text{ heures}$
Essai bayésien sans connaissance	$T = 1498 \text{ heures}$
Essai bayésien avec connaissance correcte	$T = 38 \text{ heures}$
Essai bayésien avec connaissance incorrecte	$T = 3456 \text{ heures}$
Essai accéléré	$T = 21 \text{ heures}$

Tableau 17 : Récapitulatif des durées par type d'essais

Il ressort que les essais bayésiens et accélérés réduisent significativement la durée d'essai nécessaire pour démontrer la fiabilité d'un composant. On remarque cependant qu'une connaissance a priori mal évaluée dans le cadre des essais bayésiens peut conduire à allonger la durée d'essai.

Il est également à noter que l'essai accéléré a été réalisé en sévérant uniquement le paramètre température. La détermination d'une durée d'essai plus réaliste pourra conduire à étudier également

les autres contraintes physiques.

Annexe 6 : Illustrations de la mise en œuvre de modèles paramétriques

Application 1 : Modélisation de la connaissance d'experts

Le jugement d'experts, qui peut se heurter à la difficulté de fournir des valeurs ponctuelles et précises, tend à être plus efficace pour classer les taux de défaillances de divers systèmes. C'est-à-dire que les experts qui auront du mal à estimer le taux de défaillance d'un composant, seront davantage capables de dire si un composant est plus fiable qu'un autre.

De ce fait, à partir du classement de différents systèmes selon leur taux de défaillance et si l'on connaît par un autre moyen (e.g. retour d'expérience quantifié) le taux de défaillance d'un ou plusieurs systèmes de cette liste, il est envisageable d'utiliser ces valeurs pour encadrer les taux de défaillance à estimer.

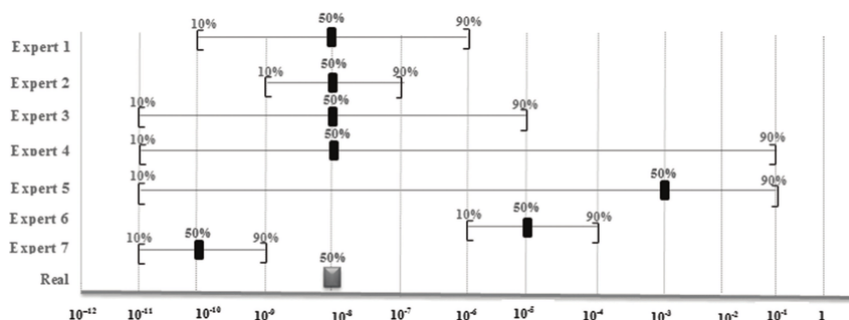


Figure 27 : Représentation de l'avis d'experts sous la forme d'intervalles

En l'absence d'informations supplémentaires, l'hypothèse la plus simple est de considérer que chaque valeur du taux de défaillance a la même probabilité sur l'ensemble de l'intervalle. Il s'agit donc d'une distribution uniforme.

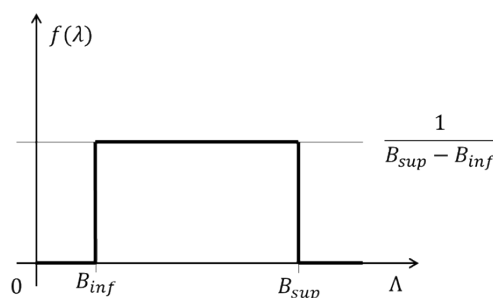


Figure 28 : Distribution uniforme d'un taux de défaillance

En revanche, si toutefois les experts sont capables d'estimer la valeur comprise dans l'intervalle la plus probable, il est possible de définir une distribution triangulaire. Cette nouvelle distribution, plus précise, apporte davantage d'information.

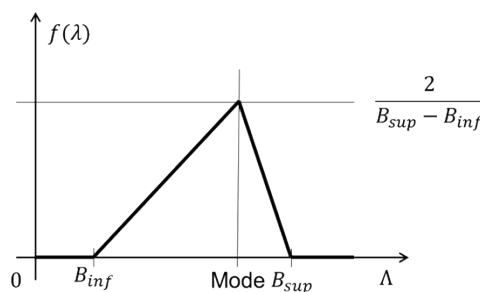


Figure 29 : Distribution triangulaire d'un taux de défaillance

Il est également possible, à partir des informations obtenues par jugements d'experts de construire une loi distribution plus complexe (Exponentielle, Gamma, Beta, Weibull...). Cela se révèle particulièrement intéressant lorsque l'on souhaite mettre en place une approche bayésienne qui facilitera les calculs si la distribution a priori (issue du jugement d'experts) et la vraisemblance (retour d'expérience) sont des lois conjuguées. On peut par exemple construire une loi Gamma à partir des estimations des experts

d'un taux de défaillance moyen $\tilde{\lambda}$ et de l'écart type $\tilde{\sigma}$. Cela nécessite que les experts s'engagent sur une forme de distribution ou d'en poser l'hypothèse.

On utilise la méthode des moments :

$$E[\lambda'] = \frac{\alpha'}{\beta'} = \tilde{\lambda} ;$$

$$\sigma^2(\lambda') = \frac{\alpha'}{\beta'^2} = \tilde{\sigma}^2 .$$

En calculant les paramètres de la loi Gamma comme suivant :

$$\beta' = \frac{\alpha'}{\beta'} \cdot \frac{\beta'^2}{\alpha'} = \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{\sigma}^2} ;$$

$$\alpha' = \tilde{\lambda} \cdot \beta' = \frac{\tilde{\lambda}^3}{\tilde{\sigma}^2} .$$

D'un point de vue plus « physique », pour la loi Gamma, cela revient à dire que les experts estiment que sur un échantillon défini on observera α' défaillances sur un temps d'observation de β' heures.

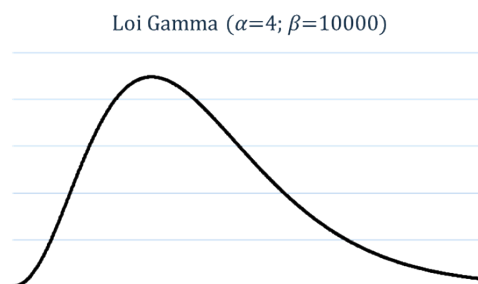


Figure 30 : Distribution d'une loi Gamma

En définitive, le jugement d'experts peut se concrétiser sous différentes formes (estimation ponctuelles, intervalle, distribution de probabilité : loi uniforme, triangulaire, Gamma, exponentielle, Weibull...) selon le degré de connaissance des experts sur le système, la confiance qu'ils ont en leurs avis, et la confiance que l'analyste a en les résultats ou les hypothèses qu'il pose.

Application 2 : Modélisation d'un retour d'expérience conséquent – Calcul de la fréquence d'occurrence d'un événement se produisant en mode continu.

Pour calculer la fréquence d'occurrence d'un événement continu, il est nécessaire de connaître à minima :

- l'expérience qui correspond à la somme des durées d'observation d'équipements similaires, exprimée en années, notée E ;
- le nombre de fois où l'occurrence de l'événement considéré a été observé au cours de l'expérience, noté N .

Un estimateur intuitif de la fréquence d'occurrence de l'événement A , noté $\hat{f}_A$ est :

$$\hat{f}_A = \frac{N}{E}$$

Cependant, ce dernier connaît plusieurs limites, à savoir :

- qu'il ne prend pas en compte la quantité d'information issue du retour d'expérience. C'est-à-dire qu'une observation de A sur 5 ans conduit au même résultat que 10 observations de A sur 50 ans ;
- que la non observation de A conduit à un résultat nul et que la non observation de A sur 1 an conduit à un meilleur résultat qu'une observation de A sur n'importe quel (grand) nombre d'années ;
- qu'il ne fournit pas d'information sur la confiance que l'on peut avoir dans ce résultat.

Pour ces raisons, l'Ineris préconise d'utiliser la borne supérieure de l'intervalle de confiance qui revient à surestimer conceptuellement le nombre d'occurrences de A observées, on obtient :

$$\hat{f}_A^{max} = \frac{1}{2E} \chi_\gamma^2(2N + 2)$$

Avec, $\chi_\gamma^2(2N + 2)$ le quantile d'ordre γ de la loi du Chi-deux de degré de liberté $2N + 2$.

Il est à noter qu'il est considéré ici que la probabilité instantanée d'occurrence est constante au cours du temps. Cette hypothèse implique que le temps moyen entre deux défaillances suit une loi exponentielle. Cela permet de simplifier les calculs, mais n'est pas nécessairement représentatif pour toutes les applications, notamment celles soumises au vieillissement.

En présence d'un retour d'expérience quantifié significatif, le lecteur pourra se référer au rapport Ineris publié en 2015 (Ineris, 2015) qui présente l'ensemble de la démarche de calcul des estimateurs de la fréquence pour différents cas d'applications :

- le cas du mode continu qui couvre par exemple les fréquences annuelles de feu d'entrepôt, de fuite d'un flexible, de défaut d'étanchéité ;
- le cas du mode sollicitation qui couvre par exemple la fuite d'un flexible par opération, le non fonctionnement d'une soupape de sécurité, l'inflammation d'une nappe de liquide inflammable suite à une fuite.

Annexe 7 : Modélisation de durée de vie de systèmes d'une station-service hydrogène à l'aide de modèles physiques déterministes

Dans le cadre du projet de recherche européen MulthyFuel, l'Ineris a proposé une approche de quantification de la durée de vie des composants d'un dispenser⁹ d'une station-service d'hydrogène gazeux. Cette approche s'apparente aux méthodes physico-probabilistes et servira donc d'illustration à ce chapitre.

Avant tout, il est important de noter que l'ensemble de la méthode (les hypothèses faites, l'application des formules physiques, etc.) ne correspond pas encore à l'état de l'art. En effet, cette méthode qui a été développée récemment, n'a fait l'objet que de quelques revues par les pairs (ICHs, 2023) et continue d'être présentée lors de congrès scientifiques (IMdR, 2024). Les informations présentées dans ce paragraphe sont tirées essentiellement du contenu du livrable 2.1 du projet MultHyFuel : *Leakage characterisation of H₂ dispenser* (Proust, 2023).

L'objectif de la méthode est d'évaluer le risque causé par la perte de confinement des différents composants du système hydrogène. A cette fin, après avoir listé l'ensemble des composants susceptibles de fuir, on identifie pour chacun toutes les causes à l'origine de ces pertes de confinement. Pour chacune, l'idée est de déterminer par le calcul la probabilité d'occurrence et la taille de la fuite.

A la date de rédaction de ce rapport, l'approche combine une approche probabiliste classique pour déterminer la probabilité des défaillances causées par des erreurs de montage, une mauvaise maintenance, ou une mauvaise utilisation du système et une approche dite physico-probabiliste pour calculer la durée de vie des composants soumis à la fatigue, à l'usure, à la corrosion ou au desserrage. C'est cette dernière approche qui sera détaillée dans le cadre de ce rapport.

Il est à noter que ce paragraphe ne présente que les causes de dégradation identifiées lors des précédents travaux et que pour d'autres procédés ou installations d'autres causes pourraient intervenir.

1. La corrosion

La corrosion est un phénomène de dégradation progressif qui réduit l'épaisseur des matériaux et diminue leurs propriétés mécaniques. Au-delà d'un certain seuil de dégradation, le composant ne satisfait plus les exigences spécifiées et des défaillances peuvent survenir, c'est par exemple le cas lorsque la résistance ou la tenue mécanique d'une capacité ou une tuyauterie devient inférieure à la contrainte mécanique causée par le fluide qu'elle contient.

Plusieurs paramètres influencent les mécanismes électrochimiques qui transforment le fer en différentes formes d'oxyde, notamment la nature de l'acier (C, Cr, Cu, Mo), mais aussi la nature de l'atmosphère (Cl, SO₂ ou bien l'humidité).

Bien que la corrosion affecte l'ensemble d'une surface exposée aux agents corrosifs, en pratique l'effet de la corrosion n'est pas homogène et peut varier selon le design du composant (i.e. sa forme, les matériaux, la présence de soudures...). Des piqures et fissures peuvent se former et causer des ruptures des composants.

On considère, par exemple, pour de l'acier que le taux de corrosion est de 5 µm/an dans un environnement sec, continental et rural. En revanche, dans un environnement pollué acide (Bogota) ou marin (Barranquilla), ce taux est multiplié par 3.

⁹ Dispenser : (Anglais, borne de distribution) – Dispositif permettant le remplissage des véhicules en H₂ gazeux à la station-service.

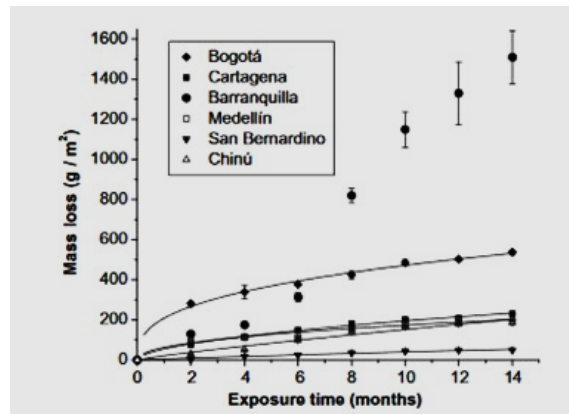


Figure 31 : Influence de l'atmosphère sur le taux de corrosion (Morcillo et al., 2013)

La comparaison des aciers dans une atmosphère urbaine montre que les aciers protégés contre la corrosion (Cor-Ten dans cet exemple) sont huit fois moins corrodés (quelques $\mu\text{m}/\text{an}$) dans les mêmes conditions. Des situations plus complexes peuvent se produire, par exemple lorsque l'acier est en contact avec du béton (immergé) ou de l'eau, ou lorsque le matériau est fortement sollicité. Dans de telles situations, la corrosion est normalement favorisée, mais elles ne sont pas prises en compte dans la présente méthode.

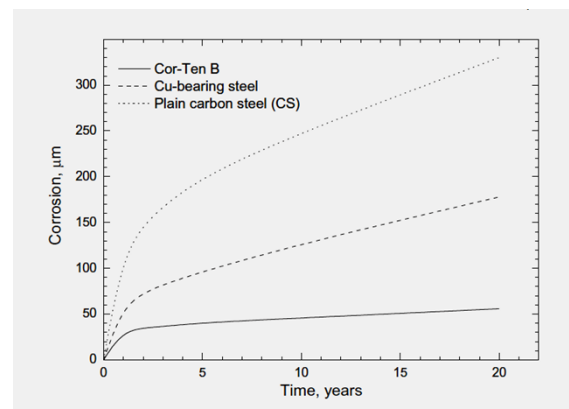


Figure 32 : Influence de l'acier sur le taux de corrosion (Castano et al., 2010)

La corrosion va avoir pour effet de diminuer l'épaisseur e de l'objet corrodé. Lorsque ce dernier est mis sous pression, la contrainte mécanique augmente en conséquence.

A noter que dans le cadre du projet MultHyFuel, seuls les tuyaux en acier sont pris en compte, les vannes et raccords étant beaucoup plus épais.

On considère que la contrainte radiale de la paroi du tuyau varie approximativement selon la loi suivante :

$$\sigma = P \cdot \frac{DN}{2 \cdot e} [1]$$

Note : cette loi ne s'applique pas aux tuyauteries avec des parois très épaisses.

Application numérique : L'objet est un morceau de tuyau en acier 3/8"-316 L (diamètre interne : $ID = 5 \text{ mm}$, épaisseur : $e = 2,25 \text{ mm}$, résistance ultime $P = 800 \text{ MPa}$) situé à l'intérieur du dispenser. Le tuyau est à l'abri de la pluie mais pas de l'humidité, ni des gaz acides et autres polluants probablement présents dans une station-service.

La situation de référence correspond à l'utilisation d'un acier carbone dans une atmosphère pure et sèche avec une vitesse de corrosion typique de $5 \mu\text{m}/\text{an}$. Toutefois, on considère que l'atmosphère est

corrosive dans le distributeur, de sorte que la vitesse de corrosion doit être multipliée par 3 ($5 \times 3 = 15 \mu\text{m}/\text{an}$). Cependant, on utilise un acier inoxydable, beaucoup plus résistant à la corrosion, de sorte que la vitesse de corrosion finale est divisée par 8 : $15/8 = 2 \mu\text{m}/\text{an}$.

L'évolution de la contrainte radiale est illustrée sur la Figure 33. La rupture se produira lorsque l'épaisseur sera tombée à 0,4 mm. Il est assez simple d'estimer le temps nécessaire pour corroder la conduite de $e = 2,25 \text{ mm}$ à cette valeur : $2,25 - 0,4 / (2/1000) \approx 1000 \text{ ans}$.

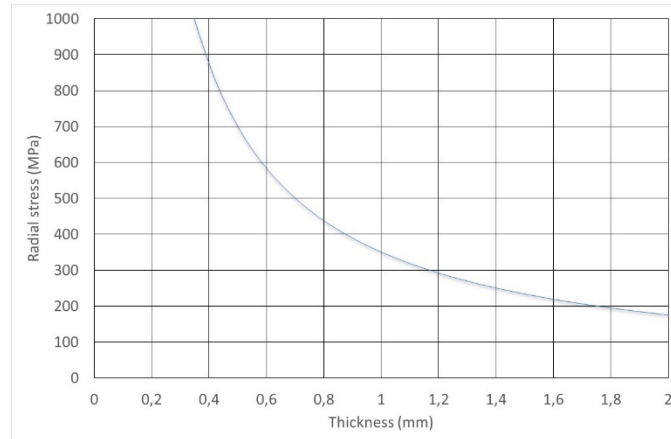


Figure 33 : Evolution de la contrainte radiale dans un tube DN10 pressurisé à 70 MPa en fonction de l'épaisseur du tube e

2. La fatigue

La fatigue est causée par l'application répétée de contraintes mécaniques sur les composants. Ces contraintes vont générer des dislocations répétées à l'intérieur du matériau pouvant être à l'origine de fissures multiples et conduire à l'occurrence d'une fracture pour des efforts restants inférieurs à la résistance maximale du composant.

Dans le cadre du projet MultHyFuel, les cycles de pression et de température sont envisagés comme pouvant conduire à une défaillance par la fatigue.

Bien que l'évolution de la température de quelques dizaines de degré ne soit pas suffisante pour modifier la nature mécanique de l'acier, elle génère une dilatation thermique différentielle à l'intérieur de la masse du matériau responsable de contraintes thermiques et donc du phénomène de fatigue.

De la même manière que pour la corrosion, le projet MultHyFuel a avant tout étudié les tuyaux dans la mesure où ils sont plus sollicités que les autres composants et susceptibles de défaillir.

Le stress causé par les cycles de pression peut être estimé par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - \nu} [2]$$

Avec E le module d'Young, ν le coefficient de Poisson et α le coefficient de dilatation thermique de l'acier. Des valeurs typiques pour l'acier 316L sont respectivement 200 GPa, 0.3 et $17 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

ΔT est la différence de température maximale entre la surface interne et la surface externe du tuyaux par exemple.

Application numérique : En reprenant l'exemple du paragraphe précédent (section de tuyau inoxydable de 3/8", $ID = 5 \text{ mm}$, $e = 2,25 \text{ mm}$), la contrainte due à un cycle de pressurisation/purge à température constante varierait entre 120 et 0 MPa.

Pour estimer la contrainte induite par la différence de température à l'intérieur du matériau, il convient de procéder à un calcul d'échange thermique. Soit T_i la température du gaz chaud qui circule à l'intérieur du tuyau, T_{pi} et T_{pe} les températures intérieure et extérieure de la paroi et T_e la température ambiante extérieure, on utilise la relation suivante :

$$\frac{\Delta T}{T_i - T_e} = \frac{T_{pi} - T_{pe}}{T_i - T_e} = \frac{e/\lambda}{1/h_i + e/\lambda + 1/h_e} [3]$$

Avec, λ la conductivité thermique de l'acier (généralement 15 W/m.°C), h_i et h_e les coefficients d'échange thermique interne et externe

Au dénominateur, le terme en h_e domine puisque seule la convection naturelle est attendue à cet endroit avec une valeur assez faible pour h_e (typiquement 15 W/m²). Ainsi, avec $e = 2,25 \text{ mm}$, le rapport des températures dans l'expression [3] est inférieur à 1%. Ainsi, même en admettant une différence de température significative entre le fluide interne et le fluide externe, typiquement 80°C dans la situation du distributeur (refroidissement de l'hydrogène à -40°C dans un environnement chaud à +40°C), ΔT ne peut pas dépasser 1°C. L'utilisation de l'expression [2] révèle que la contrainte thermomécanique induite est inférieure à 1 MPa.

Il est à noter que cette estimation dépend de la géométrie. Cette estimation est valable pour un transfert de chaleur radial de la face interne d'un morceau de tuyau vers la face externe. Pour un échange de chaleur sur la longueur du tuyau, L_{pipe} , l'expression [2] est modifiée pour tenir compte de la partie du tuyau, δ_{pipe} , soumise au gradient de température et donc à la dilatation.

$$\sigma = \frac{E \cdot \alpha}{1 - \nu} \cdot \frac{\delta_{pipe}}{L_{pipe}} \cdot \frac{\Delta T}{2} [4]$$

Les équations traditionnelles d'échange de chaleur peuvent être utilisées pour estimer δ_{pipe} (tige cylindrique semi-infinie chauffée à l'extrémité et soumise à la convection naturelle atmosphérique dans le sens latéral).

$$\delta_{pipe} = \sqrt{\frac{1 \cdot e}{h_e}} [5]$$

En utilisant le même paramètre que ci-dessus, on constate que $\delta_{pipe} = 0,05 \text{ m}$ et que $\sigma = 50 \text{ MPa}$ pour $L_{pipe} = 0,2 \text{ m}$.

Même dans des conditions aussi extrêmes, la contrainte thermomécanique s'ajoutera à la contrainte mécanique standard mais devrait rester d'une importance secondaire. Il convient toutefois de noter que la contrainte totale doit rester dans le domaine élastique.

Dans de telles conditions, en particulier si l'équipement n'est pas sollicité au-delà de sa limite d'élasticité, la limite de fatigue de toute pièce d'équipement constituée d'un matériau homogène peut être donnée par (Karaouni, 2001) :

$$N = N_{ref} \cdot \left(\frac{R_m}{2 \cdot \sigma_{max}} \right)^{1/0.12} [6]$$

Où N est le nombre de cycles avant rupture, N_{ref} un nombre de cycles de référence pour le matériau considéré, R_m est la résistance ultime du matériau (500 MPa) et σ_{max} l'amplitude maximale de la contrainte (200 MPa).

Application numérique : Prenons à nouveau comme exemple le même morceau de tuyau, avec $R_m = 800 \text{ MPa}$ et $N_{ref} = 10^7$ (Brand et al., 1999). N est de l'ordre de 10^{11} . Si, par exemple, plusieurs dizaines de cycles sont effectués chaque jour, environ 10^4 cycles sont possibles en un an. La rupture par fatigue nécessiterait $10^{11}/10^4 = 10^7 \text{ ans}$.

Si l'on souhaite appliquer cette méthode à des matériaux composites la démarche est plus compliquée. Elle devra notamment tenir compte des différences de propriétés mécaniques des différents matériaux utilisés et de leur géométrie. Dans le cadre du projet MultHyFuel, l'approche a été adaptée pour les flexibles que l'on trouve sur les dispenser des stations-service hydrogène.

D'autres sollicitations mécaniques peuvent être à l'origine de mécanismes de dégradation de fatigue, comme l'allongement ou la flexion répétés, pour lesquels des modèles ont été développés également, mais ne sont pas présentés ici.

3. Le desserrage

Les cycles mécaniques dus à la pression et dans une moindre mesure à la température peuvent être à l'origine de fuites sur les raccords et les brides. En effet, les composants vissés (raccords, presse-étoupes...) utilisés pour assurer l'étanchéité sont susceptibles de se desserrer lorsqu'ils sont soumis à des variations de la charge appliquée sur la surface de contact du filetage (Saranik, 2011 ; Liu et al., 2017 ; Paï et Hess, 2022). L'action de desserrage peut résulter soit d'une charge axiale, soit d'un effort de flexion. Une modélisation est proposée ci-après.

Pour illustrer la méthode, la situation traitée est celle de brides plates assemblées et serrées par des vis comme le montre la figure ci-dessous.

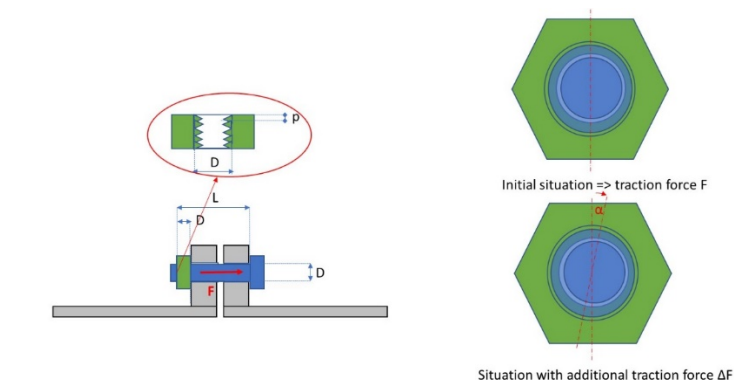


Figure 34 : Représentation graphique d'un desserrage d'une bride plate

En général, les vis sont sollicitées jusqu'à 80 % de leur limite d'élasticité (typiquement 500-600 MPa). Il existe plusieurs façons de décrire le desserrage. L'une d'entre elles consiste à considérer que le desserrage se produit lorsque l'énergie emmagasinée lors du serrage des pièces a été dissipée par le mouvement de frottement le long des filets. Comme ces deux énergies sont proportionnelles aux forces (force de serrage et force de glissement) multipliées par les produits du diamètre nominal et des angles (respectivement angle de serrage et angle de glissement), il est plus simple et équivalent de considérer la cinématique : c'est-à-dire que le desserrage se produira une fois que l'angle de serrage aura été absorbé par la somme des petits angles de déformation produits par les cycles.

Le desserrage se produit lorsque les surfaces en contact commencent à se déplacer l'une par rapport à l'autre. Le mouvement peut se produire lorsque la force supplémentaire surpasse les forces de frottement ou bien lorsque les surfaces sont soumises à la même contrainte supplémentaire, mais que les déformations ultérieures des deux surfaces en contact sont différentes.

Le premier mécanisme nécessiterait une force supplémentaire du même ordre de grandeur que la force de serrage, ce qui ne correspond pas, et de loin, aux situations étudiées dans le projet MultHyFuel. Le second mécanisme est modélisé ci-dessous de manière simplifiée.

Angle de serrage

Si σ est la contrainte appliquée sur la vis en fin de serrage, L_{sc} , la longueur de la zone filetée engagée dans l'écrou et p la taille du filetage, alors la variation de L_{sc} , ΔL_{sc} est donnée par la loi de Hooke :

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta L_{sc}}{L_{sc}} = E \cdot \frac{n \cdot p}{L_{sc}} [7]$$

Avec E le module d'Young et n la fraction de filet engagée dans l'écrou pour produire ΔL_{sc} .

En un tour ($2 \pi \text{ Rad}$) une vis progresse d'une distance p . Donc l'angle d'accostage correspondant à n est $\beta = 2 \cdot \pi \cdot n$. donc :

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\sigma \cdot L_{sc}}{E \cdot p} [8]$$

Desserrage dû à une charge axiale (Saranik, 2011 ; Liu et al., 2017)

Soit G_i le module de cisaillement des matériaux de la vis et de l'écrou ($i = 1$ ou 2), D le diamètre nominal du système vis/écrou, ΔF la force supplémentaire due aux variations de pression/température, α_i les angles moyens de déformation dans le matériau i et M le moment de frottement. L'équilibre des forces (torsion) se lit alors comme suivant :

$$M = N \cdot p \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{D}{2} \cdot \tau = f \cdot \Delta F \cdot \frac{D}{2} [9]$$

Où τ est la déformation sur les surfaces de filetage en contact, f est proche d'un coefficient de frottement (il incorpore les angles du filetage), p la taille du filetage et N le nombre de filets dans l'écrou ($N \cdot p = L_{sc}$). Les déformations des surfaces de contact peuvent être exprimées comme suivant :

$$\tau = G_1 \cdot \alpha_1 = G_2 \cdot \alpha_2 [10]$$

Avec, $G_1 = \frac{E_1}{2 \cdot (1 + \nu)}$ et $\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_2$.

L'angle de glissement $\Delta \alpha$ est responsable de la dissipation de l'énergie de vissage. On peut obtenir une expression pour $\Delta \alpha$ (en supposant que les écarts entre les matériaux sont faibles), puis une estimation du nombre de cycles nécessaires pour desserrer le système vis-écrou :

$$N_{axial-cycles} = \frac{\beta}{\Delta \alpha} [11]$$

Avec $\Delta \alpha = \tau \cdot \left(\frac{1}{G_1} - \frac{1}{G_2} \right) \approx \tau \cdot \frac{\Delta G}{G^2} \approx \frac{\tau}{G} \cdot \frac{\Delta E}{E} \approx \left(f \cdot \frac{\Delta E}{E} \right) \cdot \frac{\Delta F}{G \cdot \pi \cdot D \cdot L_{sc}}$

Desserrage dû à une charge radiale (Pai et al., 2022)

La même formule que ci-dessus peut être utilisée mais un lien est nécessaire pour dériver ΔF de la force radiale F_r ou du moment de flexion M_{bend} . Si L_r est la distance normale entre l'écrou et le point d'action de F_r , alors, on a :

$$M_{bend} = F_r \cdot L_r = \Delta F \cdot D [12]$$

Soit ΔF la pression multipliée par la section du tuyau.

La plupart des paramètres peuvent être connus de manière assez précise, à l'exception de f et $\Delta E/E$. Le coefficient de frottement dans un contact acier-acier non lubrifié devrait être d'environ 0,1 (voir la norme VDI 2230). L'examen des différentes valeurs données pour le module d'Young pour le même matériau suggère que $\Delta E/E$ pourrait être de l'ordre de 1%. La comparaison des modèles actuels avec les expériences (Pai et al., 2022) révèle que la meilleure adéquation entre ce modèle et le nombre observé de cycles nécessaires au desserrage de l'objet vissé est obtenue lorsque $f \cdot \Delta E/E$ est d'environ 0,001, en accord avec l'estimation précédente ($0,1 \times 0,01$).

Un très grand nombre de cycles est nécessaire pour parvenir à desserrer un raccord sous l'effet d'une charge axiale. Ce nombre est nettement inférieur lorsque l'on s'attend à une charge radiale. Toutefois, il est peu probable que l'effort radial soit entièrement transmis à la vis, car les pièces utilisées pour dévier le flux ne sont pas libres de se déplacer. Cette dernière estimation est certainement très prudente et n'a pas été prise en compte dans la suite de ce document.

4. L'usure

Les pièces mobiles telles que les tiges de vannes, la pièce de fermeture d'un clapet anti-retour (dans la rupture et dans la buse) ou les joints de la buse qui glissent sur le réceptacle sont concernées par les mécanismes d'usure.

L'usure (Kragelskii, 1965) est le résultat du cisaillement imposé par le frottement entre deux pièces mobiles. Le cisaillement dépend de la nature des matériaux en contact, de la force normale au plan, de la vitesse du mouvement ou de sa longueur. Tout cela détermine la quantité de matériau usé. L'usure produit des particules de la taille d'un micron qui s'agglomèrent facilement et peuvent former des croûtes.

Dans le cadre du projet MultiHyfuel, on s'attend à des frottements métal-métal et métal-polymère.

Des données ont été extraites de la littérature pour quantifier les taux d'usure spécifiques (Zum Gahr, 1989 ; Lancaster, 1969), $q_{spec-usure}$ sous charge normale et frottement prolongé :

- Le taux d'usure acier/acier est mesuré entre 10^7 et $10^8 \mu\text{m}^3/(\text{km} \cdot \text{N})$. En km la longueur de la zone de glissement et en N la force normale. La limite supérieure est utilisée dans le modèle.
- Le taux d'usure acier/polymère est estimé entre 10^8 et $10^9 \mu\text{m}^3/(\text{km} \cdot \text{N})$. La limite supérieure est utilisée dans le modèle.

Les joints en polymère ont généralement une grande capacité de déformation (jusqu'à 30 % en compression), de sorte qu'une partie importante doit être abrasée avant qu'une fuite puisse être observée. Pour les joints métal-métal comme dans les clapets anti-retour, l'examen de la constitution interne du dispositif (Figure 35) révèle qu'une fuite est attendue lorsque la partie mobile (la bille) a perdu environ 10% de son diamètre. Par simplification, un seuil de 10% d'abrasion de la pièce d'étanchéité a été admis.

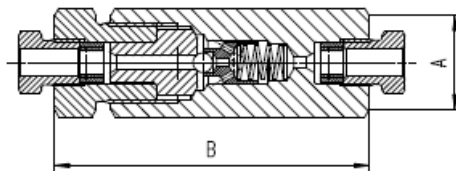


Figure 35 : Croquis d'un clapet de retenue à cône haute pression (extrait du catalogue Maximator)

Considérons un joint (torique ou sphérique) de diamètre D_{seal} (s'il est sphérique) et d'épaisseur e_{seal} . A chaque cycle (ex : connexion de la buse au réceptacle, fermeture du clapet anti-retour, rotation de la tige d'une vanne...), la distance de glissement L_{slide} est soumise au frottement sous la force normale F_N . Ainsi, à chaque cycle, la quantité (i.e. le volume) de matière suivante est enlevée par la contrainte de frottement :

$$Q_{wear} = q_{spec-wear} \cdot F_N \cdot L_{slide} \quad [13]$$

Et la réduction correspondante de l'épaisseur s'exprime comme suit :

$$\delta_{seal} = \frac{Q_{wear}}{\pi \cdot D_{seal}} \quad [14]$$

Pour un clapet de non-retour, la force normale appliquée lors de la fermeture est certainement proche de celle de la pression P appliquée sur la bille.

Pour la tige d'une vanne standard, la force normale est due à la compression des bagues toriques lors du serrage du presse-étoupe. Cette compression déforme les bagues et les applique sur la tige. Ce qui est connu, c'est que la force de compression est suffisante pour éviter une fuite à la pression P , ce qui suggère que la contrainte locale à l'intérieur de la zone de contact est au moins égale à P .

Un raisonnement similaire peut être fait pour les joints de la buse de sorte que :

$$F_N = P \cdot \pi \cdot D_{seal} \cdot e_{seal} [15]$$

5. Vérification de la méthode

C'est une méthode fastidieuse et lourde à développer car elle nécessite de développer ou d'adapter les modèles physiques à chaque composant et pour chaque configuration d'exploitation pour tous les modes de dégradation.

L'auteur de la méthode précise que les modèles développés pour la fatigue, le desserrage et l'usure sont volontairement simplifiés afin de pouvoir calculer des estimations des durées de vie plus simplement. Pour le desserrage, il est rappelé que le modèle repose sur l'hypothèse qu'il est principalement causé par des déformations différentielles dues à des différences de module d'Young ou de coefficient de Poisson. Pour l'usure, le modèle n'incorpore que l'influence des principaux paramètres via des valeurs expérimentales en fonction d'une force normale et d'un frottement prolongé.

6. Validation de la méthode

Afin de valider la méthode, des essais en laboratoire ont été menés afin de challenger les modèles et de comparer les résultats obtenus théoriquement avec l'expérimentation. A cette fin, 4 essais ont été réalisés :

- Usure des joints en polymère autour de la tige d'une vanne 3/8" ;
- Usure de la bille métallique d'un clapet anti-retour 3/8" ;
- Desserrage dû à un cycle de pression des raccords union 3/8" ;
- Cyclage de pression d'un boyau 1/4".

Sans rentrer dans le détail du protocole de réalisation de ces tests, il convient de préciser que les résultats expérimentaux tendent à confirmer la théorie. Par faute de temps ou de moyen, plusieurs des essais n'ont pu aboutir à l'observation de la défaillance.

Annexe 8 : Calcul de la probabilité de fuite d'une tuyauterie au moyen de la pondération bayésienne du jugement d'experts par des données de retour d'expérience

L'objectif de la mise en œuvre de la démarche est le calcul de la probabilité de fuite d'une tuyauterie à partir de l'élicitation d'avis d'experts et d'un retour d'expérience partiel sur des équipements similaires.

Modélisation de l'a priori

A partir de leurs connaissances, des experts estiment que la probabilité de fuite annuelle d'une tuyauterie est comprise entre : $3.10E^{-6}/m/an$ et $3.10E^{-5}/m/an$. Soit : $\lambda_{min} = 3.10^{-6} \leq \hat{\lambda} \leq \lambda_{max} = 3.10^{-5}$. On fait l'hypothèse que l'avis des experts est plutôt fiable, on choisit donc de modéliser l'expertise à l'aide d'une loi informative Gamma dont on cherche à déterminer le paramètre de forme α et le paramètre de d'échelle β .

$$\lambda \sim Gamma(\alpha, \beta)$$

$$f(\lambda; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \lambda^{\alpha-1} e^{-\lambda\beta}$$

Connaissant les formules pour calculer la moyenne et la variance de l'estimateur :

$$\mu = \frac{\alpha}{\beta}$$

$$\sigma^2 = \frac{\alpha}{\beta^2}$$

On propose d'appliquer la méthode des moments. Pour cela, on fait l'hypothèse que les valeurs fournies par les experts représentent les bornes de l'intervalle de crédibilité à 90% du taux de défaillance. En faisant une approximation, grâce à la loi normale, on obtient le système d'équation suivants :

$$\hat{\lambda} = \frac{\lambda_{max} + \lambda_{min}}{2} = 1,65.10^{-5}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{2 \times 1,64} = 8,21.10^{-6}$$

Il vient donc :

$$\frac{\alpha}{\beta} = \hat{\lambda} = 1,65.10^{-5}$$

$$\frac{\alpha}{\beta^2} = \hat{\sigma}^2 = (8,21.10^{-6})^2$$

En résolvant le système, on obtient les paramètres de la loi a priori suivants :

$$\alpha = 4,04$$

$$\beta = 2,45.10^5$$

Modélisation de la vraisemblance

Par la suite, 150 installations fonctionnant en continu toute l'année ont été observées sur une période de 15 ans afin d'en collecter le retour d'expérience. Elles cumulent un total de 37 500 m de tuyauterie. L'expérience cumulée est donc :

$$t_c = 15 \times 150 \times 250 = 562\,500 \text{ m.an}$$

Sur la totalité de cette expérience, 4 pertes de confinement ont été observées.

Pour modéliser la vraisemblance correspondant à ce cas de figure, on choisit le modèle de la loi exponentielle et on calcule la vraisemblance comme présenté précédemment.

$$\mathcal{L}(\lambda; t_1, \dots, t_n) = \lambda^n e^{-\lambda \sum_{i=1}^n t_i}$$

En remplaçant n par le nombre de pertes de confinement et la somme $\sum_{i=1}^n t_i$ par la durée d'observation totale, on obtient la fonction de vraisemblance suivante :

$$\mathcal{L}(\lambda; t_c) = \lambda^4 e^{-562\,000\lambda}$$

Calcul de la densité a posteriori et conclusions

Comme vu précédemment, la loi a priori Gamma et le modèle de vraisemblance exponentielle sont deux lois conjuguées. La fonction a posteriori obtenue est donc une loi Gamma de paramètres :

$$\lambda_{post} \sim \text{Gamma}(\alpha + n, \beta + t_c)$$

$$f(\lambda; k, t_c, a, b) = \frac{(\beta + t_c)^{\alpha+n}}{\Gamma(\alpha + n)} \lambda^{\alpha+n-1} e^{-(\beta+t_c)\lambda}$$

L'estimateur a posteriori de λ_{post} , correspond à son espérance et est calculé comme suivant :

$$E[\lambda_{post}] = \frac{\alpha + n}{\beta + t_c} = 9,96.10^{-6}$$

Et on peut calculer la borne supérieure de l'intervalle de crédibilité à 90% du taux de défaillance en faisant une approximation par la loi du Chi-deux.

$$\lambda_{post,max} = \frac{\chi_{0,95}^2(2\alpha + 2n)}{2(\beta + t_c)} = 1,63.10^{-5}$$

Finalement on représente sur un graphique la densité de probabilité a priori du taux de défaillance et la densité de probabilité a posteriori.

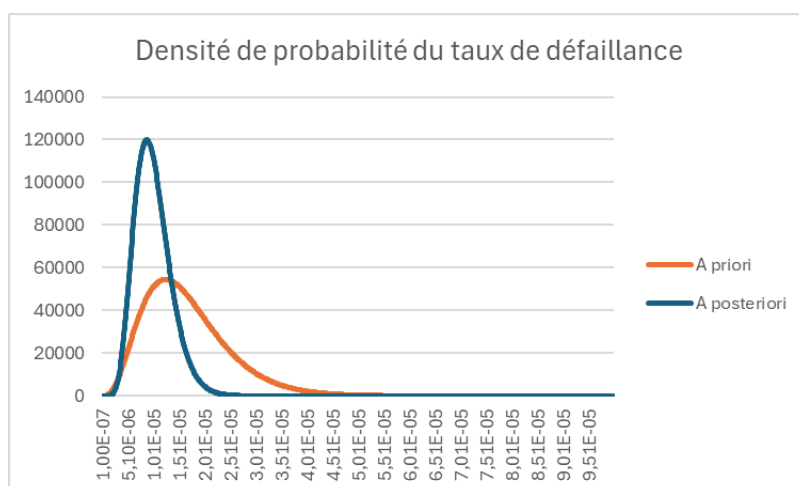


Figure 36 : Densités de probabilité du taux de défaillance a priori et a posteriori

On remarque donc en observant les courbes et en comparant les valeurs des estimateurs de λ a priori et a posteriori que le taux de défaillance a posteriori est plus faible.

Cela s'explique par le fait, qu'on a modélisé a priori un taux de défaillance correspondant à environ 4 défaillances sur une période équivalente à 245 000 ans, que l'on a ensuite corrigé avec une information correspondant à 4 défaillances sur une période équivalente à 562 500 ans. La vraisemblance exprime un nombre d'accidents identique sur une période d'observation plus longue, donc un taux de défaillance plus faible.

