



**HAL**  
open science

**AVISE, une démarche d'Anticipation du Vieillissement  
par Interrogation et Stimulation d'Experts, application à  
un matériel passif d'une centrale nucléaire: le  
pressuriseur**

Leïla Bouzaiene-Marle

► **To cite this version:**

Leïla Bouzaiene-Marle. AVISE, une démarche d'Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts, application à un matériel passif d'une centrale nucléaire: le pressuriseur. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Centrale Paris, 2005. Français. NNT: . tel-00271619

**HAL Id: tel-00271619**

**<https://theses.hal.science/tel-00271619>**

Submitted on 9 Apr 2008

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

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



*ECOLE CENTRALE PARIS*

# THÈSE DE DOCTORAT

DISCIPLINE : GENIE INDUSTRIEL

---

## AVISE, Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts.

*Application à un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur.*

---

Présentée par  
**Leïla BOUZAÏENE-MARLE**

Pour l'obtention du  
Grade de Docteur  
de l'Ecole Centrale Paris

**Soutenue le 04 avril 2005**

*Devant le jury composé de :*

<b>Président</b>	Yves Dutuit	IUT - Université de Bordeaux 1
<b>Rapporteurs</b>	Emmanuel Caillaud Bernard Dumon	IPST - Université de Strasbourg ISTIA - Université d'Angers
<b>Examineurs</b>	Kaïsa Simola André Lannoy	VTT Technical Research Centre of Finland Institut de Maîtrise des Risques - SdF
<b>Co-Directeurs de thèse</b>	Jean-Claude Bocquet François Pères	EC Paris - LGI ENI Tarbes
<b>Membres invités</b>	François Billy Philippe Haïk	EDF - R&D EDF - R&D

**2005-09**



*A mon petit chéri*



# Sommaire

Remerciements .....	i
Table des matières .....	iii
Table des figures .....	xiii
Liste des tableaux .....	xvii
Introduction générale .....	1
Chapitre 1 : Problématique et positionnement bibliographique .....	11
Chapitre 2 : Construction de la démarche AVISE .....	31
Chapitre 3 : Le jugement d'expert pour l'anticipation .....	49
Chapitre 4 : La stimulation d'experts pour l'anticipation .....	73
Chapitre 5 : Modélisation et quantification dans la démarche d'anticipation par l'utilisation des réseaux bayésiens .....	91
Chapitre 6 : Capitalisation de la démarche et des résultats de l'anticipation.....	123
Chapitre 7 : Validation de la démarche d'anticipation, application à un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur .....	145
Conclusion générale .....	177
Annexes .....	185
Publications et communications .....	309
Bibliographie .....	311



---

## Remerciements

---

Je tiens à remercier **François Pérès** et **Jean-Claude Bocquet** qui ont encadré cette thèse dans la continuité de mon stage de DEA. Je les remercie pour leur disponibilité, leur soutien et leurs conseils avisés tout au long de mes recherches.

Je tiens ensuite à remercier les trois personnes qui m'ont encadré au sein de la Division Recherche & Développement d'EDF. Tout d'abord, j'exprime ma gratitude à **André Lannoy** sans qui ces travaux de recherche n'auraient jamais vu le jour. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordé et pour tous les efforts qu'il a fourni dans l'encadrement de la thèse. Je remercie également **Philippe Haïk** qui m'a fait confiance et qui m'a encadré depuis mon stage de DEA sur les aspects Management des Connaissances. Je souhaite enfin remercier **François Billy** qui m'a encadré dans ce travail de recherche sur les aspects liés à la fiabilité et qui m'a fourni toutes les informations nécessaires à l'application pratique de la démarche AVISE développée dans le cadre de la thèse.

Je tiens à remercier les rapporteurs de ce mémoire, les professeurs **Emmanuel Caillaud** et **Bernard Dumon** pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour les commentaires qu'ils ont pu y apporter. Merci également au professeur **Yves Dutuit** pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Je remercie également l'ensemble des membres du jury pour avoir, par leurs nombreuses questions, permis un échange et une discussion franche, approfondie et enrichissante.

Je souhaite remercier **Kaïsa Simola** qui a accepté d'apporter son avis d'expert sur la classification des méthodes d'interrogation d'experts et **Jean-Pierre Bourey** pour ses précieuses recommandations en modélisation conceptuelle des données.

Je tiens à remercier l'ensemble des experts d'EDF qui ont accepté de participer à l'application pratique de ce travail de recherche : The-Hiep Chau, François Vaillant, Jean-Luc Bretelle, Bruno Barthelet, René Boudot, Marc Grosgeorge, André Lannoy, Jacques Guillet et Alain Le-Brun. Merci pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux et pour leur collaboration enrichissante.

Je remercie l'**Institut de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement**, et plus particulièrement **Jean-Pierre Petit**, pour avoir mis à ma disposition ses locaux et sa bibliothèque. Je souhaite également remercier tous les membres d'**ESReDA**, en particulier **Henri Procaccia**, pour m'avoir donné l'occasion de profiter de la richesse des échanges tout au long des différents séminaires.

Je tiens à exprimer ma vive reconnaissance à la grande famille du Laboratoire Génie Industriel qui m'a accueilli et intégré depuis mon DEA et tout au long de ma thèse. Je remercie particulièrement **Sylvie, Anne et Corinne** qui m'ont soutenue et qui ont toujours été présentes à mes côtés. Je remercie également les membres de l'équipe **CIRCARE** pour tout ce que nous avons échangé.

Enfin, je tiens à remercier toute ma famille et mes amis de m'avoir soutenue au quotidien et jusqu'à la dernière ligne droite, tout particulièrement mon mari **Franck**. Je tiens finalement à exprimer toute ma reconnaissance à mes parents **Taoufik et Faouzia** qui m'ont fait confiance et qui m'ont donné les moyens de partir si loin de la maison pour réaliser mes projets.

---

## Table des matières

---

<b>Table des matières</b>	<b>iii</b>
<b>Table des figures</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xvii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Cadre et domaine de recherche</b>	<b>3</b>
<b>Méthodologie de recherche</b>	<b>4</b>
<b>Contributions</b>	<b>6</b>
<b>Guide de lecture</b>	<b>8</b>
<b>Repères typographiques</b>	<b>10</b>
<b>Abréviations</b>	<b>10</b>
<b>Chapitre 1 : Problématique et positionnement bibliographique</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Problématique et définitions</b>	<b>12</b>
<i>1.1.1 Le contexte industriel : la gestion du cycle de vie</i>	<i>12</i>
1.1.1.1 La gestion du vieillissement physique du matériel	12
1.1.1.2 La gestion des coûts	13
1.1.1.3 Le besoin d'anticipation pour la gestion du cycle de vie	14
<i>1.1.2 La problématique</i>	<i>15</i>
1.1.2.1 Le besoin d'informations existantes : le retour d'expérience	15
1.1.2.2 Le besoin d'expertise	16
1.1.2.3 Formulation de la problématique	16
<b>1.2 Positionnement bibliographique</b>	<b>17</b>
<i>1.2.1 La maintenance</i>	<i>17</i>
1.2.1.1 Définition de la maintenance	17
1.2.1.2 Typologie de la maintenance	17
1.2.1.3 Les cinq niveaux de maintenance	18
<i>1.2.2 Les défaillances</i>	<i>18</i>
1.2.2.1 Définition de la défaillance	18

1.2.2.2 Typologies des défaillances	19
1.2.2.3 L'analyse des défaillances	19
1.2.3 <i>La sûreté de fonctionnement et la fiabilité</i>	19
1.2.3.1 Définition de la sûreté de fonctionnement	20
1.2.3.2 Définition de la fiabilité	20
1.2.3.3 L'intérêt à évaluer la fiabilité d'un système	20
1.2.3.4 Un bref historique des premiers domaines d'application de la fiabilité	20
1.2.3.5 Typologie des méthodes de fiabilité	21
1.2.4 <i>La fiabilité à la conception : exemple de l'AMDE</i>	21
1.2.4.1 Les domaines d'application de l'AMDE	22
1.2.4.2 Les différentes phases de l'AMDE	22
1.2.4.3 Points forts et points faibles de l'AMDE	23
1.2.5 <i>La fiabilité à moyen terme : exemple, la démarche OMF</i>	23
1.2.5.1 Les domaines d'application de la démarche OMF	23
1.2.5.2 Les différentes phases de la démarche OMF	23
1.2.5.3 Points forts et points faibles de la démarche OMF	24
1.2.6 <i>La fiabilité à long terme : premier exemple, la démarche LCM</i>	25
1.2.6.1 Les domaines d'application de la démarche LCM	25
1.2.6.2 Les différentes phases de la démarche LCM	25
1.2.6.3 Points forts et points faibles de la démarche LCM	25
1.2.7 <i>La fiabilité à long terme : deuxième exemple, la démarche RIPBR</i>	26
1.2.7.1 Les domaines d'application de la démarche RIPBR	26
1.2.7.2 Les différentes phases de la démarche RIPBR	26
1.2.7.3 Points forts et points faibles de la démarche RIPBR	26
1.2.8 <i>La fiabilité à long terme : troisième exemple, la démarche PMDA-PIRT</i>	27
1.2.8.1 Le contexte de développement de la démarche PMDA-PIRT	27
1.2.8.2 Les phases de l'approche PIRT	27
1.2.8.3 Points forts points faibles et de la démarche PMDA-PIRT	28
<b>Conclusion</b>	<b>28</b>
<b>Chapitre 2 : Construction de la démarche AVISE</b>	<b>31</b>
<b>2.1 Le matériel dans la démarche d'anticipation</b>	<b>32</b>
2.1.1 <i>Les matériels passifs et les matériels actifs</i>	32
2.1.2 <i>Les matériels critiques</i>	33
<b>2.2 Les acteurs et les flux d'information dans la démarche d'anticipation</b>	<b>34</b>
<b>2.3 Identification du processus d'anticipation</b>	<b>35</b>
<b>2.4 Vers une démarche globale d'anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement</b>	<b>37</b>

2.4.1 Identification des différentes phases de la démarche AVISE .....	37
2.4.2 Construction des différentes phases de la démarche AVISE : choix d'outils ou de méthodes à adapter ou à développer .....	38
<b>Phase 1-</b> Définition du contexte et des objectifs de la démarche d'anticipation .....	38
<b>Phase 2-</b> Identification et collecte de l'information nécessaire pour l'anticipation .....	38
<b>Phase 3-</b> Processus d'anticipation .....	41
<i>Etape 1- Identification des mécanismes de dégradation</i> .....	41
<i>Etape 2- Evaluation de la pertinence des mécanismes identifiés à un horizon d'exploitation donné</i> .....	42
<i>Etape 3- Analyse et hiérarchisation des défaillances potentielles (modes, conséquences, criticité)</i> .....	43
<i>Etape 4- Identification et évaluation des parades</i> .....	43
<b>Phase 4-</b> Synthèse et capitalisation .....	46
4.1- Capitalisation .....	46
4.2- Synthèse et communication des résultats .....	46
<b>Conclusion</b> .....	47
<b>Chapitre 3 : Le jugement d'expert pour l'anticipation</b> .....	<b>49</b>
<b>3.1 Le jugement d'expert</b> .....	<b>50</b>
3.1.1 Historique .....	50
3.1.2 Définition de l'expert et de l'expertise .....	51
3.1.3 Les axes de recherche .....	51
<b>3.2 Analyse de différentes méthodes d'interrogation d'experts</b> .....	<b>52</b>
3.2.1 Description des méthodes : les fiches .....	52
3.2.2 Processus générique d'une méthode d'interrogation d'experts .....	56
<b>3.3 Le jugement d'expert pour l'anticipation</b> .....	<b>59</b>
3.3.1 Besoin du jugement d'expert pour l'anticipation des défaillances .....	59
3.3.2 Spécifications d'une méthode d'interrogation d'experts pour l'anticipation des défaillances .....	60
3.3.3 Classification des méthodes d'interrogation d'experts par rapport aux besoins de l'anticipation.....	61
3.3.3.1 L'objectif .....	61
3.3.3.2 Les experts interrogés .....	61
3.3.3.3 Les données d'entrée .....	62
3.3.3.4 La préparation des questions .....	62
3.3.3.5 L'élicitation .....	63
3.3.3.6 Les résultats de l'élicitation et l'agrégation .....	63
3.3.3.7 Le diagramme anticipation/effort .....	64
3.3.3.8 Synthèse de la classification .....	65

3.3.4 Critique des méthodes par rapport à l'anticipation	65
3.3.5 Apports et conclusions de l'analyse	66
<b>3.4 Intégration de l'interrogation d'expert dans la démarche d'anticipation</b>	<b>67</b>
3.4.1 Intégration de l'interrogation d'expert dans le processus d'anticipation	67
3.4.1.1 Définition des objectifs de l'élicitation	68
3.4.1.2 Choix des experts à éliciter	68
3.4.1.3 Préparation du questionnaire	69
3.4.1.4 Élicitation	70
3.4.1.5 Agrégation et modélisation des réponses des experts	70
3.4.1.6 Synthèse et capitalisation	71
3.4.2 La stimulation et l'analyse dans l'anticipation	71
<b>Conclusion</b>	<b>72</b>
<b>Chapitre 4 : La stimulation d'experts pour l'anticipation</b>	<b>73</b>
4.1 L'aide à la créativité	74
4.1.1 Classifications des méthodes de créativité	74
4.1.2 Les logiques de mise en œuvre d'une méthode de créativité par Jaoui	75
4.1.3 La notion d'outil père par Vadcard	75
4.1.4 La méthode TRIZ	76
4.1.5 La notion d'inertie psychologique	77
4.2 Construction de la méthode STIMEX-IMDP	77
4.2.1 L'identification des informations nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode	77
4.2.2 Les listes de référence de mécanismes de dégradation et de modes ou effets du vieillissement	79
4.2.3 Le retour d'expérience analogue	80
4.2.4 La structuration de la sélection des mécanismes potentiels	81
4.2.5 La synthèse des résultats	84
4.3 Construction de la méthode STIMEX-IPP	85
4.3.1 La structuration de la méthode	85
4.3.2 La synthèse des résultats	88
<b>Conclusion</b>	<b>89</b>
<b>Chapitre 5 : Modélisation et quantification dans la démarche d'anticipation par l'utilisation des réseaux bayésiens</b>	<b>91</b>
5.1 Présentation des réseaux bayésiens	92
5.1.1 Les concepts de base	92
5.1.2 Les probabilités	92
5.1.2.1 Les probabilités a priori	92

5.1.2.2 Les probabilités conditionnelles	93
5.1.2.3 Les probabilités a posteriori	93
5.1.3 Les logiciels	94
5.1.4 Les différentes utilisations d'un réseau bayésien	94
5.1.5 Construction d'un réseau bayésien	96
<b>5.2 Les réseaux bayésiens pour l'évaluation de la pertinence des mécanismes de dégradation</b>	<b>97</b>
5.2.1 Construction du réseau bayésien par expertise	97
5.2.1.1 Description des évolutions apportées à la structure	97
5.2.1.2 Validation	99
5.2.1.3 Description des variables du modèle (résultat final des deux expertises)	99
5.2.2 Quantification des probabilités	103
5.2.2.1 Des questionnaires pour renseigner les probabilités a priori	103
5.2.2.2 Des tableaux pour renseigner les probabilités conditionnelles	103
5.2.2.3 Elicitations	104
5.2.3 Interprétation des résultats	108
5.2.4 Analyse de sensibilité et identification des paramètres influents	108
5.2.5 Un réseau bayésien « générique » pour l'évaluation de la pertinence de la corrosion sous contraintes à l'horizon $t$	110
5.2.6 Synthèse des résultats	112
<b>5.3 Les réseaux bayésiens pour l'évaluation de l'impact sur le vieillissement d'un mécanisme de dégradation</b>	<b>113</b>
5.3.1 Construction du réseau bayésien par expertise	113
5.3.1.1 Description des évolutions apportées à la structure	113
5.3.1.2 Description des variables du modèle	113
5.3.2 Quantification des probabilités	117
5.3.3 Interprétation des résultats	118
5.3.4 Analyse de sensibilité et identification des paramètres influents	118
5.3.5 Synthèse des résultats	120
<b>Conclusion</b>	<b>121</b>
<b>Chapitre 6 : Capitalisation de la démarche et des résultats de l'anticipation</b>	<b>123</b>
<b>6.1 La capitalisation des connaissances dans l'entreprise</b>	<b>124</b>
6.1.1 La connaissance	124
6.1.2 Les différentes typologies des connaissances de l'entreprise	124
6.1.3 Dynamique et cycle de vie des connaissances	125
6.1.4 La gestion des connaissances et ses enjeux dans l'entreprise	126
6.1.5 Typologies des approches de gestion des connaissances	128

6.1.6	<i>La capitalisation des connaissances</i>	128
<b>6.2</b>	<b>Un exemple d'outil de capitalisation des données de vieillissement</b>	<b>129</b>
6.2.1	<i>Description de la base GALL, Generic Aging Lessons Learned</i>	129
6.2.2	<i>Limites et intérêts de la base GALL selon Lannoy et Procaccia</i>	131
6.2.3	<i>Les données à capitaliser dans une base de vieillissement</i>	133
<b>6.3</b>	<b>La capitalisation dans le cadre de la démarche AVISE</b>	<b>134</b>
6.3.1	<i>Identification des connaissances à capitaliser</i>	135
6.3.1.1	<i>Capitalisation du déroulement de la démarche d'anticipation</i>	135
6.3.1.2	<i>Capitalisation des résultats de la démarche d'anticipation : élaboration d'un modèle conceptuel de données</i>	136
6.3.2	<i>Création d'une base de données (maquette)</i>	140
6.3.3	<i>Différentes utilisations possibles de la base de données de vieillissement</i>	141
<b>Conclusion</b>		<b>142</b>
<b>Chapitre 7 : Validation de la démarche d'anticipation, application à un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur</b>		
<b>7.1</b>	<b>Choix du matériel pour l'application de la démarche</b>	<b>146</b>
<b>7.2</b>	<b>Description du matériel choisi : le pressuriseur</b>	<b>147</b>
<b>7.3</b>	<b>Application de la démarche d'anticipation au pressuriseur</b>	<b>147</b>
7.3.1	<i>Phase 1 : Définition du contexte et des objectifs de la démarche d'anticipation</i>	148
7.3.2	<i>Phase 2 : Identification et collecte de l'information nécessaire pour l'anticipation</i>	148
7.3.3	<i>Phase 3 : Processus d'anticipation</i>	150
7.3.3.1	<i>Etape 1 : Identification des mécanismes de dégradation potentiels</i>	150
1-	<i>Réunion 1 : définition des objectifs de l'élicitation</i>	150
2-	<i>Réunion 1 : choix des experts</i>	150
3-	<i>Réunion 1 : préparation du questionnaire</i>	151
4-	<i>Réunion 1 : élicitation</i>	151
5-	<i>Réunion 1 : agrégation des résultats</i>	155
6-	<i>Réunion 1 : synthèse et capitalisation</i>	155
7.3.3.2	<i>Etape 2 : Etude de la pertinence des mécanismes identifiés à 60 ans d'exploitation</i>	155
7.3.3.3	<i>Etape 3 : Analyse et hiérarchisation des mécanismes potentiels</i>	156
7.3.3.4	<i>Etape 4 : Identification et évaluation des parades potentielles</i>	157
1-	<i>Réunion 2 : définition des objectifs de l'élicitation</i>	157
2-	<i>Réunion 2 : choix des experts</i>	157
3-	<i>Réunion 2 : préparation du questionnaire</i>	157
4-	<i>Réunion 2 : élicitation</i>	159
5-	<i>Réunion 2 : agrégation des résultats</i>	163

6- Réunion 2 : synthèse et capitalisation	167
7.3.4 Phase 4 : Synthèse et capitalisation	167
<b>7.4 Evaluation de la démarche d'anticipation</b>	<b>167</b>
7.4.1 Evaluation de la mise en œuvre de la démarche : application des méthodes de stimulation d'experts dans le cadre de réunions collectives	167
7.4.1.1 Evaluation des méthodes de stimulation d'experts dans le cadre de réunions collectives	167
7.4.1.2 Les apports méthodologiques de l'application	169
7.4.2 Evaluation des résultats de l'application	169
7.4.2.1 Comparaison des résultats avec ceux obtenus lors d'une étude moins structurée	169
7.4.2.2 Comparaison des résultats avec ceux obtenus par GALL	170
7.4.2.3 Les apports industriels de l'application	172
7.4.3 Généricité de la démarche d'anticipation : application à des matériels actifs, les machines tournantes	172
7.4.3.1 Adaptation de la démarche d'anticipation dans sa structure	172
7.4.3.2 Adaptabilité des méthodes de stimulation d'experts	173
7.4.3.3 Adaptabilité des réseaux bayésiens	173
<b>Conclusion</b>	<b>175</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>177</b>
<b>Résultats scientifiques</b>	<b>180</b>
<b>Résultats industriels</b>	<b>182</b>
<b>Perspectives scientifiques</b>	<b>183</b>
<b>Perspectives industrielles</b>	<b>184</b>
<b>Annexes</b>	<b>185</b>
<b>Annexe 1 : Fiches descriptives des méthodes d'interrogation d'experts</b>	<b>187</b>
Fiche NUREG-1150	189
Fiche STUK-VTT	191
Fiche NNC	193
Fiche FEJ-GRS	195
Fiche KEEJAM	197
Fiche CTN-UPM	199
Fiche TUD	200
Fiche LCM	202
Fiche TRIZ-AFD	204
Fiche RIPBR	206
Fiche PMDA-PIRT	208

<b>Annexe 2 : Classification des méthodes d'aide à la créativité selon leur logique de mise en œuvre.....</b>	<b>211</b>
<b>Annexe 3 : Document 1, « Présentation de la démarche d'anticipation, son contexte et ses objectifs » .....</b>	<b>215</b>
1. <i>Matériel étudié, limite de l'application</i> .....	219
2. <i>Contexte de l'application</i> .....	219
3. <i>Présentation de la démarche</i> .....	220
<b>Annexe 4 : Document 2, « Informations pour l'anticipation » .....</b>	<b>223</b>
1. <i>Typologie des informations relatives au matériel</i> .....	228
2. <i>Principales sources d'informations pour le matériel étudié : le pressuriseur</i> .....	230
3. <i>Informations collectées pour le pressuriseur</i> .....	231
3.1 <i>Les données de conception</i> .....	231
3.2 <i>Les données relatives aux matériaux</i> .....	233
3.3 <i>Les données fonctionnelles</i> .....	235
3.4 <i>Les paramètres de fonctionnement</i> .....	236
3.5 <i>Les données d'environnement</i> .....	236
3.6 <i>Les données d'exploitation</i> .....	236
3.7 <i>Les données de maintenance</i> .....	238
3.8 <i>Les données de retour d'expérience</i> .....	239
3.9 <i>Les données de fiabilité</i> .....	240
4. <i>Les annexes</i> .....	243
Annexe 4.1 : Schémas techniques du pressuriseur et des différents tracés de la ligne d'expansion LEP .....	245
Annexe 4.2 : Liste et affectation des pressuriseurs 900 MWe .....	251
Annexe 4.3 : Les caractéristiques mécaniques et chimiques des matériaux .....	252
Annexe 4.4 : Les caractéristiques des principales opérations de soudage et de revêtement .....	253
Annexe 4.5 : Classification de la qualité de fabrication des soudures des pressuriseurs en exploitation (REX) .....	254
Annexe 4.6 : Le découpage matériel .....	255
Annexe 4.7 : Les spécifications chimiques du milieu primaire et le hors spécifications.....	259
Annexe 4.8 : Comptabilisation des situations du pressuriseur .....	260
Annexe 4.9 : Les contrôles des différentes zones et soudures du pressuriseur et de la LEP .....	265
Annexe 4.10 : Analyse du REX SAPHIR .....	267
Annexe 4.11 : Retour d'expérience étranger : événements importants .....	269
Annexe 4.12 : Retour d'expérience analogue .....	270

Annexe 4.13 : Problèmes potentiels concernant le pressuriseur à l’horizon de 60 ans (EDF projet durabilité) .....	273
Annexe 4.14 : AMDE pressuriseur suivant le GALL .....	274
Annexe 4.15 : Les facteurs d’usage .....	275
<b>Annexe 5 : Document 3, « Synthèse des résultats de la démarche d’anticipation » .....</b>	<b>277</b>
1. <i>Identification des mécanismes de dégradation potentiels</i> .....	282
2. <i>Evaluation de la criticité des mécanismes de dégradation potentiels en fonction de la     pertinence et de la gravité</i> .....	284
3. <i>Evaluation de la maintenance et identification des parades potentielles pour quelques     triplets critiques identifiés</i> .....	285
<b>Annexe 6 : Liste EDF de mécanismes de dégradation et de modes de ruine .....</b>	<b>289</b>
<b>Annexe 7 : Liste EPRI de mécanismes de dégradation .....</b>	<b>293</b>
<b>Annexe 8 : Liste ISO/CD 14224 de mécanismes de dégradation et de modes de défaillance ....</b>	<b>297</b>
<b>Annexe 9 : Résultats de l’expertise pour l’évaluation de la pertinence .....</b>	<b>301</b>
<b>Annexe 10 : Résultats de l’expertise pour l’évaluation de la gravité .....</b>	<b>305</b>
<b>Publications et communications .....</b>	<b>309</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>311</b>



---

## Table des figures

---

Figure 1 : Les différents jalons de la méthodologie de recherche et les contributions correspondantes	.....5
Figure 2 : Processus d'anticipation et démarche globale d'anticipation	.....6
Figure 3 : Processus d'interrogation d'experts pour l'anticipation	.....6
Figure 4 : La stimulation d'expert pour l'anticipation	.....7
Figure 5 : Les réseaux bayésiens pour l'anticipation	.....7
Figure 6 : Capitalisation de la démarche d'anticipation et de ses résultats	.....7
Figure 1.1 : Le contexte de l'anticipation	.....13
Figure 1.2 : Le besoin d'anticipation	.....14
Figure 1.3 : Les données d'entrée et de sortie de la démarche d'anticipation	.....17
Figure 1.4 : Les quatre grandes étapes de la démarche OMF	.....24
Figure 2.1 : Informations relatives à la démarche d'anticipation	.....34
Figure 2.2 : Les acteurs et les flux d'informations dans la démarche d'anticipation	.....34
Figure 2.3 : Les étapes d'un processus d'anticipation des défaillances dues au vieillissement d'un matériel	.....36
Figure 2.4 : Du processus d'anticipation vers une démarche globale	.....37
Figure 2.5 : Les sources d'information pour l'anticipation	.....39
Figure 2.6 : L'ensemble des données relatives au matériel	.....40
Figure 2.7 : Positionnement des ressources informationnelles et méthodologiques sur le processus d'anticipation	.....45
Figure 2.8 : Capitalisation dans la démarche d'anticipation	.....46
Figure 2.9 : Anticipation des défaillances et aide à la décision	.....47
Figure 3.1 : Schéma pour la classification des méthodes d'interrogation d'experts	.....61
Figure 3.2 : Questionnaire pour la classification des méthodes d'interrogation d'experts	.....62
Figure 3.3 : Classification des méthodes d'interrogation d'experts	.....64
Figure 3.4 : Processus d'anticipation et processus d'interrogation d'experts	.....67

Figure 3.5 : Répartition des étapes de l'anticipation entre stimulation (élicitations collectives) et analyse (élicitations individuelles) .....	71
Figure 4.1 : Résoudre un problème par TRIZ [Cavallucci, 1998] .....	76
Figure 4.2 : Génération et sélection par les experts des mécanismes de dégradation potentiels .....	78
Figure 4.3 : Filtres successifs pour l'identification de couples Zone/mécanisme potentiels .....	82
Figure 4.4 : Méthode STIMEX-IMDP, stimulation d'experts pour l'identification des mécanismes de dégradation potentiels .....	84
Figure 4.5 : Méthode STIMEX-IPP, stimulation d'experts pour l'identification de parades potentielles .....	88
Figure 5.1 : Exemple de réseau bayésien .....	92
Figure 5.2 : Modélisation d'un diagnostic médical par un réseau bayésien (exemple de [BayesiaLab]) .....	95
Figure 5.3 : Modélisation en fonction du temps d'un système dynamique par un réseau bayésien (exemple de [BayesiaLab]) .....	95
Figure 5.4 : Version 2 du réseau bayésien pour la pertinence de la fatigue thermique à un horizon t .....	98
Figure 5.5 : Version 3 du réseau bayésien pour la pertinence de la fatigue thermique à l'horizon t ( $t_0$ étant l'instant d'observation) .....	102
Figure 5.6 : Pertinence de la fatigue thermique à 60 ans de la ligne d'expansion du pressuriseur (réseau final, prenant en compte les deux expertises, septembre 2004) .....	105
Figure 5.7 : Tableau des probabilités conditionnelles de la variable de sortie « pertinence de la fatigue thermique à 60 ans » .....	106
Figure 5.8 : Pertinence de la fatigue thermique à l'entrée du coude de la LEP : zone avec stratification thermique .....	107
Figure 5.9 : Pertinence de la fatigue thermique dans la zone du fond du pressuriseur : zone sans stratification thermique .....	108
Figure 5.10 : Réseau bayésien « générique » pour l'évaluation de la pertinence de la Corrosion sous contraintes à l'horizon t .....	111
Figure 5.11 : Version 1 (novembre 2002) du réseau bayésien pour l'évaluation de l'impact sur le vieillissement d'un mécanismes de dégradation .....	116
Figure 5.12 : Réseau bayésien pour l'évaluation de l'impact de la fatigue thermique sur le vieillissement du pressuriseur à 60 ans au niveau de la tubulure d'expansion (version finale du réseau) .....	117
Figure 5.13 : Réseau bayésien pour l'évaluation de l'impact de la fatigue thermique sur le vieillissement du pressuriseur à 60 ans au niveau de la tubulure d'aspersion (version finale du réseau) .....	118
Figure 6.1 : Les quatre modes de conversion de la connaissance [Nonaka et Takeuchi, 1995] .....	125
Figure 6.2 : Le processus de valorisation-diffusion des connaissances [Ballay, 1999b] .....	126

Figure 6.3 : Modèle conceptuel de données pour la capitalisation des résultats de la démarche d'anticipation (réalisé sous le logiciel PowerAMC) .....	137
Figure 6.4 : Les tables relationnelles de la base de données de vieillissement (réalisé sous Microsoft Access) .....	141
Figure 7.1 : Situation du pressuriseur dans le schéma d'une tranche nucléaire REP .....	147
Figure 7.2 : Résultat de l'association Zone/mécanisme lors de la réunion 1 .....	152
Figure 7.3 : Matrice de pertinence en fonction de la probabilité d'amorçage et de la cinétique de dégradation.....	156
Figure 7.4 : Matrice de criticité en fonction de la pertinence et de la gravité .....	157
Figure 7.5 : Interface d'accueil de l'outil « Elicitation » de traitement de l'expertise .....	165
Figure 7.6 : Interface de demande d'analyse des données .....	166
Figure 7.7 : Exemples de résultats donnés par l'outils de traitement de l'expertise .....	166
Figure 7.8 : Evaluation du vieillissement pour les machines tournantes à un horizon d'exploitation de 30ans.....	174
Figure 7.9 : Evaluation du vieillissement pour les machines tournantes à un horizon d'exploitation de 40ans.....	174
Figure 7.10 : Evaluation du vieillissement pour les machines tournantes à un horizon d'exploitation de 50ans.....	175



---

## Liste des tableaux

---

Tableau 1.1 : Les cinq niveaux de la maintenance [Mercier, 1992] .....	18
Tableau 2.1 : Comparaison actifs/passifs .....	32
Tableau 3.1 : Poids attribués par les experts aux différentes méthodes (Deuxième expertise) .....	63
Tableau 3.2 : Classification des méthodes par rapport à l'anticipation (Deuxième expertise) .....	63
Tableau 3.3 : Classification des méthodes par rapport à l'effort de mise en œuvre (Deuxième expertise) .....	64
Tableau 3.4 : Critique des méthodes par rapport à l'anticipation .....	65
Tableau 3.5 : Experts et types d'entretiens pour le processus d'anticipation .....	70
Tableau 4.1 : Outils pères selon la logique de mise en œuvre [Vadcard, 1996] .....	76
Tableau 4.2 : Structure de la liste EPRI de mécanismes de dégradation [Carey, 2001] .....	79
Tableau 4.3 : Liste de référence des mécanismes de dégradation .....	80
Tableau 4.4 : Liste de référence des modes de ruine ou effets du vieillissement .....	80
Tableau 4.5 : Les différentes informations présentées lors des filtres successifs .....	83
Tableau 4.6 : Méthodes génériques d'évaluation du vieillissement [CEC, 2000] .....	87
Tableau 4.7 : Exemples de méthodes préventives pour contrer le vieillissement [CEC, 2000].....	87
Tableau 5.1 : Variables d'entrée du nœud X1 de l'exemple .....	93
Tableau 5.2 : Table de probabilités conditionnelles du nœud 4 de l'exemple .....	93
Tableau 5.3 : Les variables et les liens d'influence du réseau pour la pertinence de la fatigue thermique ...	101
Tableau 5.4 : Les probabilité conditionnelles du nœud « gradient de température du fluide » .....	103
Tableau 5.5 : Analyse de sensibilité de la variable de sortie « Fatigue pertinente » par rapport aux variables d'entrée (probabilités exprimées en %) .....	109
Tableau 5.6 : Analyse de sensibilité de la variable de sortie « Fatigue pertinente » par rapport aux variables d'entrée avec une valeur moyenne du facteur d'usage (probabilités exprimées en %) .....	109
Tableau 5.7 : Les variables et les liens d'influence du réseau pour l'impact sur le vieillissement .....	115
Tableau 5.8 : Analyse de sensibilité de la variable de sortie « Impact sur le vieillissement » par rapport aux variables d'entrée (probabilités exprimées en %) .....	119

Tableau 7.1 : Les sources d'informations nécessaires à l'anticipation chez EDF .....	148
Tableau 7.2 : Questionnaire pour la première réunion dans le cadre de l'application de la démarche d'anticipation au pressuriseur et sa LEP .....	151
Tableau 7.3 : Triplets Zone/Mécanisme/Modes ou effets du vieillissement potentiels pour le pressuriseur et sa LEP .....	153
Tableau 7.4 : Situations accidentelles pour le pressuriseur et sa LEP .....	155
Tableau 7.5 : Evaluation de la pertinence des couples Zone/Mécanisme de dégradation .....	158
Tableau 7.6 : Evaluation de la gravité des couples Zone/Mécanisme de dégradation .....	158
Tableau 7.7 : Questionnaire pour la deuxième réunion dans le cadre de l'application de la démarche d'anticipation au pressuriseur et sa LEP .....	159
Tableau 7.8 : Evaluation de la criticité des mécanismes de dégradation potentiels, en fonction de la pertinence et de la gravité .....	160
Tableau 7.9 : Les contrôles non destructifs pour le triplet 1 [Bordes,2000].....	162
Tableau 7.10 : Les contrôles non destructifs pour le triplet 3 [Bordes,2000] .....	163
Tableau 7.11 : L'évaluation de la pertinence pour le couple ensemble de l'enveloppe externe/ corrosion due à une fuite d'acide borique concentré .....	164
Tableau 7.12 : L'évaluation de la gravité pour le couple ensemble de l'enveloppe externe/ corrosion due à une fuite d'acide borique concentré par les experts .....	165
Tableau 7.13 : Identification des problèmes potentiels concernant le pressuriseur à l'horizon de 60 ans – extrait de l'étude [Billy et al., 2003] .....	170
Tableau 7.14 : Les couples Zone/Mécanisme potentiels pour le pressuriseur d'après le GALL .....	171

# **Introduction générale**



## Cadre et domaine de recherche

Ce travail se situe dans le cadre de la gestion du cycle de vie (« Life Cycle Management ») des matériels (systèmes, structures ou composants) d'une installation. Certains matériels représentent de gros investissements pour l'entreprise. En plus des coûts d'acquisition et d'implantation, ils nécessitent souvent une maintenance importante. Toutefois, si un matériel a été conçu avec un niveau de qualité élevé, s'il est bien maintenu et si les mécanismes de dégradation sont bien maîtrisés, alors il est possible d'envisager de prolonger sa durée d'exploitation au-delà de celle initialement prévue à la conception. Cette prolongation permet d'amortir encore plus l'investissement de départ.

Des problèmes autres que ceux identifiés à la conception peuvent néanmoins apparaître à la fin de la durée d'exploitation ou lorsqu'on envisage de la prolonger. Il convient par conséquent d'anticiper ces défaillances potentielles, susceptibles de se produire pendant la période de fin de vie. L'objectif de cette recherche est donc de proposer une démarche pour réaliser cette anticipation.

Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte le retour d'expérience passé du matériel, les modifications réalisées par rapport à la conception, et les conditions d'exploitation et de maintenance actuelles ou prévisionnelles.

Dans le cadre de cette étude, nous proposons pour l'anticipation la définition suivante :

**L'anticipation** est l'identification des événements potentiellement pénalisants en termes de sûreté, de disponibilité ou de coûts, avant qu'ils ne se produisent, afin d'évaluer les risques qu'ils représentent et de préparer et mettre en œuvre les mesures ou les parades adéquates.

Ces événements peuvent être accidentels, dus à des agressions externes (un séisme, par exemple) ou à des incidents internes (l'explosion d'une pompe dans l'installation). Ils peuvent être le résultat d'erreurs de conception (ce type de défaillance apparaît souvent dès les premières années d'exploitation). Ils peuvent être aussi le résultat du vieillissement :

- le vieillissement physique subi par les matériels,
- la perte des compétences des personnels exploitant l'installation (vieillesse des personnels et problèmes de gestion des compétences) : cet aspect humain ne sera pas traité dans le cadre de cette étude.

Comme nous nous plaçons dans un contexte de gestion du cycle de vie, nous nous focalisons sur l'anticipation des défaillances dues au vieillissement des installations. Tout composant qui vieillit subit des mécanismes de dégradation qui agissent sur les matériaux dans des conditions physiques particulières. Ceci provoque la dégradation du matériau qui se manifeste par des effets mesurables. Au cours du temps, cette dégradation peut s'aggraver et, à partir d'un certain seuil, elle peut engendrer la défaillance du matériel. Il s'agit donc d'anticiper ces mécanismes de dégradation et les éventuelles dégradations ou défaillances qu'ils peuvent provoquer sur un matériel donné.

# Méthodologie de recherche

La figure 1, en page suivante, présente sur la colonne de gauche les différents jalons de la méthodologie de recherche adoptée dans le cadre de cette étude et sur la colonne de droite les contributions correspondant à chaque jalon. Ce mémoire est structuré par rapport à la méthodologie de recherche et aux contributions réalisées : les chapitres de la thèse correspondent à ces jalons.

## Formulation de la problématique de recherche et étude de l'existant

Le premier jalon de la méthodologie consiste à formuler la problématique de recherche et ensuite à la positionner par rapport à l'existant, suite à une étude bibliographique (chapitre 1).

## Construction d'une démarche globale suite à l'identification d'un processus d'anticipation

Ensuite, nous adoptons une approche descendante « top-down » pour identifier le processus d'anticipation. En effet, partant de la définition même de l'anticipation, nous décrivons quatre étapes permettant d'obtenir les résultats de l'anticipation. Ces étapes s'inscrivent dans une démarche globale d'anticipation, que nous présentons par la suite en quatre phases (chapitre 2).

Ainsi, nous parlons

d'« **étapes** » uniquement par rapport au processus d'anticipation,

et de « **phases** » uniquement par rapport à la démarche d'anticipation.

## Outillage de la démarche

A chaque phase de la démarche d'anticipation, des besoins méthodologiques sont identifiés. Pour chaque besoin, nous proposons un choix justifié de méthodes ou d'outils.

Quatre chapitres (chapitres 3, 4, 5 et 6) sont ainsi consacrés à la description des méthodes et outils de la démarche. Dans chaque chapitre, nous présentons d'une manière générale la méthode ou les concepts qui l'inspirent. Nous illustrons ensuite la manière avec laquelle la méthode ou l'outil a été construit(e) ou adapté(e) à la démarche d'anticipation.

## Application et validation

Afin de valider la démarche proposée, une application à un matériel passif d'une centrale nucléaire, le pressuriseur, a été réalisée. Elle permet de confronter la démarche développée à la réalité du terrain, et de mettre en évidence les différentes améliorations et modifications nécessaires. Pour la validation de la démarche, nous proposons également d'évaluer les résultats de l'application et d'étudier sa généralité (chapitre 7).

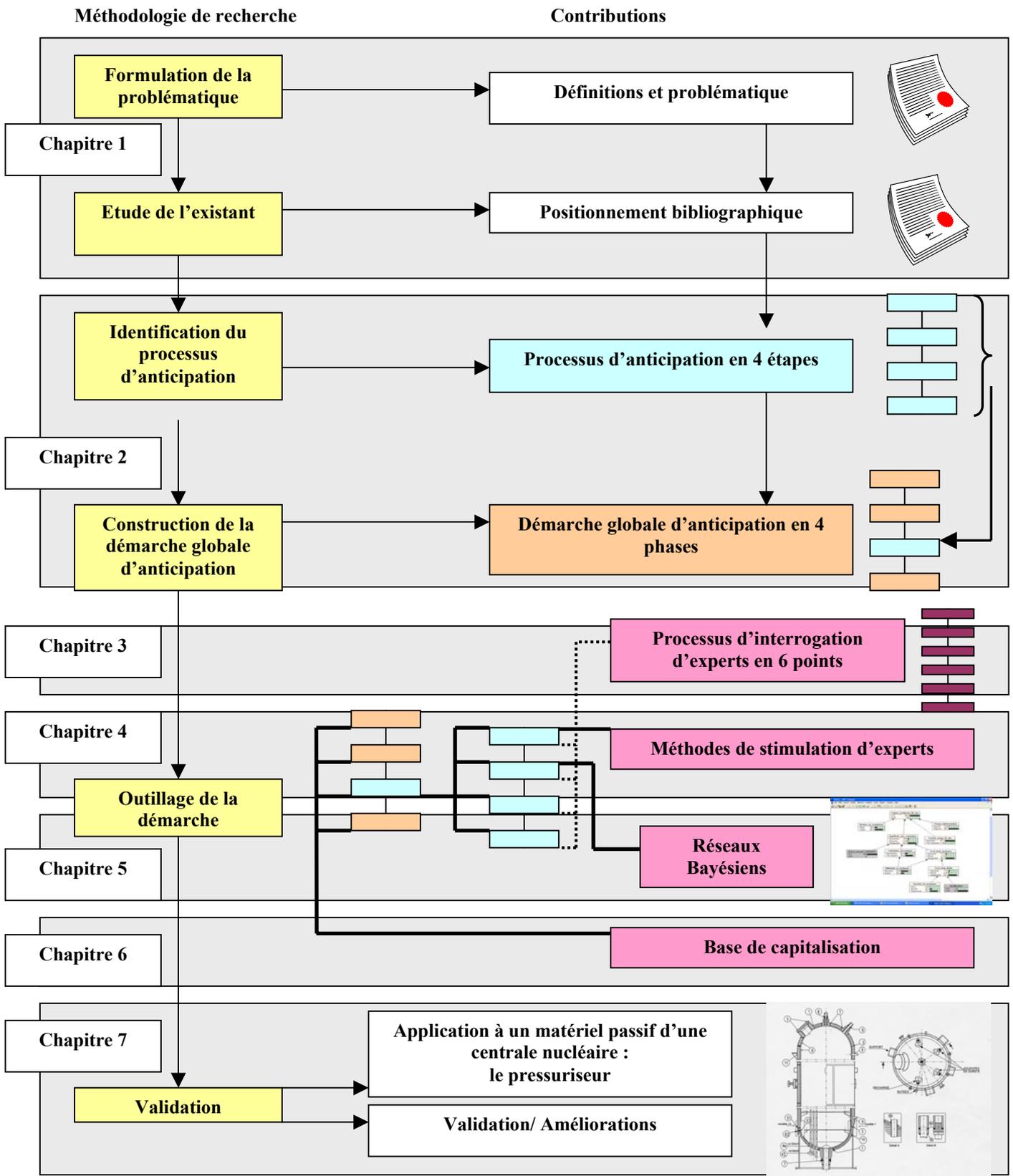


Figure 1 : Les différents jalons de la méthodologie de recherche et les contributions correspondantes.

## Contributions

Dans l'optique de prolonger la durée d'exploitation d'un matériel, nous nous proposons dans ce travail d'élaborer une démarche qui permet d'anticiper les défaillances potentielles dues au vieillissement.

Pour cela, il faut tout d'abord identifier le (ou les) mécanisme(s) de dégradation qui peu(ven)t être à l'origine de ces défaillances. Cependant, tous les mécanismes potentiels ne sont pas critiques pour le fonctionnement du matériel. Certains ont une cinétique lente, d'autres ont des conséquences négligeables qui n'affectent pas le fonctionnement du matériel, d'autres encore sont parfaitement maîtrisés par la maintenance existante. Il faut donc évaluer la criticité de ces mécanismes et, pour ceux qui sont jugés critiques, identifier les mesures à mettre en œuvre éventuellement pour surveiller, éviter ou ralentir leur apparition.

Ces résultats sont structurés dans un processus d'anticipation en quatre étapes, qui s'inscrit lui-même dans une démarche globale en quatre phases (voir figure 2).

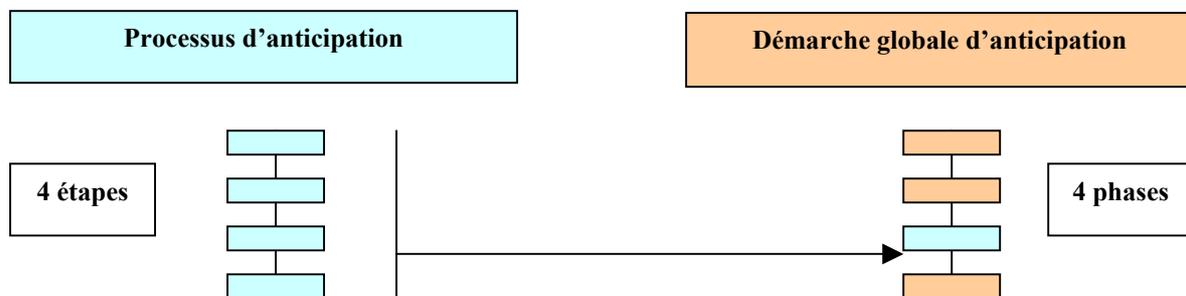


Figure 2 : Processus d'anticipation et démarche globale d'anticipation.

La présente étude se situe dans un cadre particulier, celui du nucléaire. Ce contexte implique plusieurs caractéristiques du matériel : des matériels spécifiques, l'importance de la sûreté, une qualité élevée de conception, et une maintenance exigeante. Ces caractéristiques se traduisent par un faible retour d'expérience (faible nombre de défaillances) qui peut rendre difficile toute étude statistique. La démarche élaborée dans cette étude intègre ces caractéristiques et permet de résoudre les contraintes qui en résultent. Elle est néanmoins applicable à tout problème d'anticipation quel que soit le secteur industriel.

Pour compenser ce faible retour d'expérience, la solution « classique » consiste à recueillir le jugement d'expert. L'expertise contribue alors à compléter les données du retour d'expérience. Nous considérons l'expert ici comme une source pertinente d'informations. Pour cela, nous avons identifié un processus générique d'interrogation d'experts, en six points, qui a été adapté à la démarche et qui intervient à chaque étape du processus d'anticipation (voir figure 3).

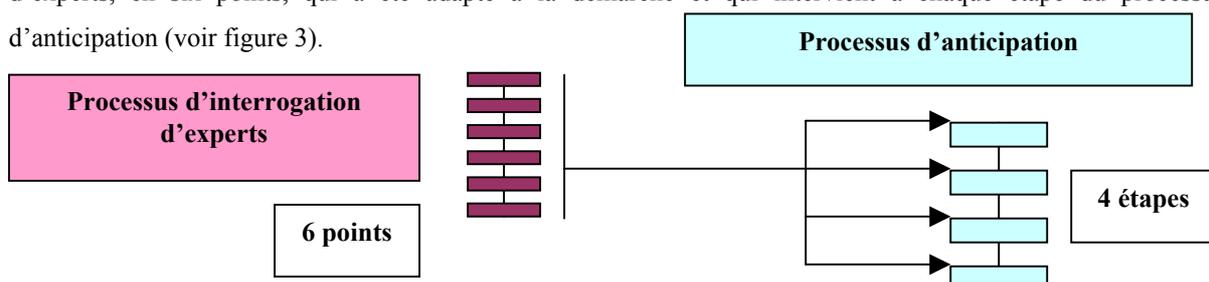


Figure 3 : Processus d'interrogation d'experts pour l'anticipation.

D'autre part, l'analyse fonctionnelle, les documents de conception et particulièrement les études RCM, Reliability Centered Maintenance (RCM est adaptée chez EDF en tant qu'OMF, Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité), peuvent renseigner sur les défaillances potentielles d'un matériel. Le retour d'expérience peut donner des informations sur les défaillances avérées, effectivement observées d'un matériel. Mais, si les conditions d'environnement, d'exploitation, de maintenance ou la durée d'exploitation du matériel changent par rapport à celles considérées à la conception, seule l'expertise peut permettre d'anticiper l'impact de ces changements. En s'appuyant sur les données existantes, l'expert peut identifier les défaillances potentielles qui pourraient éventuellement apparaître à la suite de ces changements de conditions. Pour stimuler l'expert et l'aider dans ces étapes d'identification, nous avons développé deux méthodes complémentaires de stimulation qui interviennent respectivement dans les étapes 1 et 4 du processus d'anticipation (voir figure 4). La première méthode, appelée STIMX-IMDP, permet d'identifier les mécanismes de dégradation potentiels (étape 1) et la deuxième méthode, appelée STIMEX-IPP, permet d'identifier les parades potentielles (étape 4).

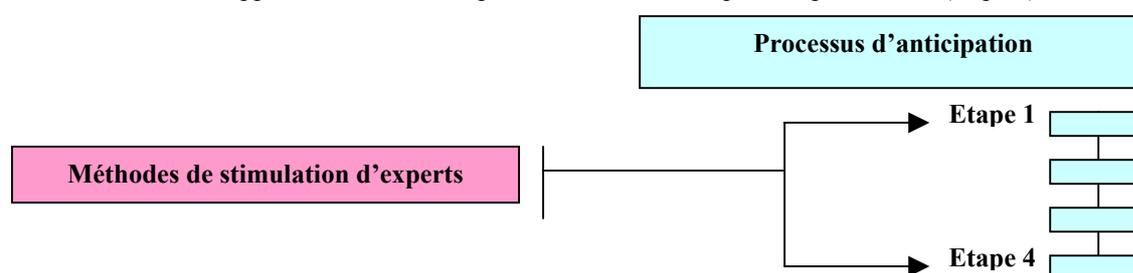


Figure 4 : La stimulation d'experts pour l'anticipation.

Pour aider les experts dans les étapes 2 et 3 du processus d'anticipation, des réseaux bayésiens ont été construits et quantifiés (voir figure 5). Ces réseaux permettent d'évaluer la pertinence d'un mécanisme de dégradation potentiel (étape 2) et son impact sur le vieillissement du matériel (étape 3).

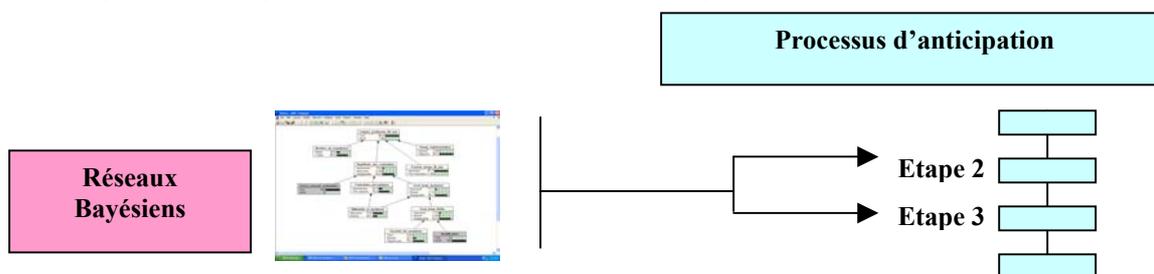


Figure 5 : Les réseaux bayésiens pour l'anticipation.

Une base de données a finalement été élaborée pour la capitalisation de la démarche d'anticipation et de ses résultats. Cette capitalisation concerne donc l'ensemble de la démarche d'anticipation (voir figure 6).

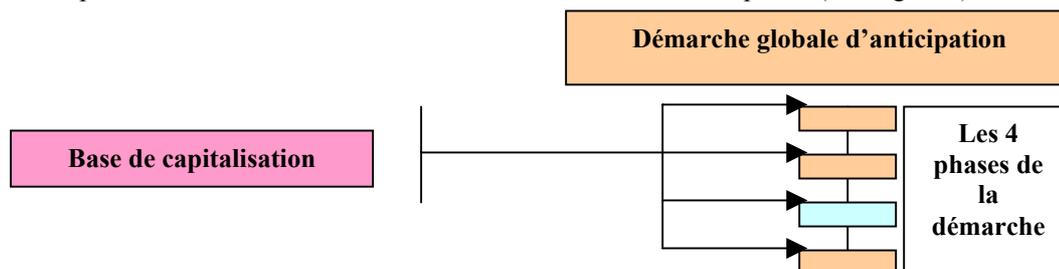


Figure 6 : Capitalisation de la démarche d'anticipation et de ses résultats.

## **Guide de lecture**

Ce mémoire de thèse est constitué de 7 chapitres structurés selon la méthodologie de recherche et les résultats obtenus.

### **Chapitre 1 : Problématique et positionnement bibliographique**

Il a pour objectif de préciser la problématique de ce travail de recherche et les apports attendus par rapport à l'existant. Un certain nombre de définitions y sont présentées.

Ensuite, un positionnement bibliographique situe cette étude dans son contexte académique. Nous donnons quelques exemples de méthodes de fiabilité à la conception et de fiabilité à moyen terme, ainsi qu'un état de l'art des méthodes existantes dans le domaine de la fiabilité à long terme.

### **Chapitre 2 : Construction de la démarche AVISE**

Il présente la construction de la démarche d'anticipation, intitulée AVISE, Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts. En partant de la définition de l'anticipation, un processus a été identifié.

Ce processus s'intègre dans une démarche globale que nous décrivons en quatre phases : la définition du contexte et des objectifs de la démarche d'anticipation, l'identification et la collecte de l'information nécessaire pour l'anticipation, le processus d'anticipation et finalement la synthèse et la capitalisation de la démarche et de ses résultats. Nous précisons pour chaque phase les besoins méthodologiques, ainsi que les méthodes et outils proposés pour répondre à ces besoins. Une justification de ces choix sera également donnée dans ce chapitre 2.

Les chapitres 3, 4, 5 et 6 présentent les supports méthodologiques développés ou adaptés pour la démarche d'anticipation. Dans chaque chapitre, une première partie est consacrée à la présentation de l'outil ou de la méthode d'une façon générale. Ensuite, nous décrivons la conception ou l'adaptation de l'outil dans le cadre de la démarche d'anticipation.

### **Chapitre 3 : Le jugement d'expert pour l'anticipation**

Dans ce chapitre, la première partie présente l'interrogation d'experts de manière générale. Ensuite, un ensemble de méthodes d'interrogation d'experts, principalement utilisées dans le secteur nucléaire, est présenté. Une première analyse de ces méthodes existantes a permis d'identifier un processus générique d'interrogation d'experts.

La troisième partie de ce chapitre s'intéresse plus particulièrement au jugement d'expert pour l'anticipation. Le premier paragraphe permet de mettre en évidence le besoin de l'utilisation d'avis d'experts pour l'anticipation. Ce besoin se traduit par un ensemble de fonctions et de contraintes auxquelles doit satisfaire une méthodologie d'interrogation d'experts pour l'anticipation. Une analyse et une classification des méthodes présentées ont été réalisées avec l'aide de plusieurs experts afin d'identifier celles qui semblent les plus intéressantes pour

l'anticipation et qui ne nécessitent pas d'efforts trop importants de mise en œuvre. Un certain nombre de critères intéressants pour l'anticipation ont été identifiés suite à cette analyse. En tenant compte de ces critères et du processus générique d'interrogation d'experts identifié dans la deuxième partie de ce chapitre 3, nous présentons finalement l'élaboration d'une méthode d'interrogation d'experts pour la démarche d'anticipation.

## **Chapitre 4 : La stimulation d'experts pour l'anticipation**

Dans ce chapitre, la première partie introduit un état de l'art des méthodes de travail en groupe et d'aide à la créativité. Ensuite, nous présentons la construction de deux méthodes de stimulation d'experts : une pour l'identification des mécanismes de dégradation potentiels d'un matériel et une deuxième destinée à l'identification des parades potentielles.

## **Chapitre 5 : Modélisation et quantification dans la démarche d'anticipation par l'utilisation des réseaux bayésiens**

Dans ce chapitre, la première partie introduit un bref état de l'art sur les réseaux bayésiens. Dans la seconde partie, nous présentons une démarche de construction d'un réseau bayésien permettant d'évaluer la pertinence d'un mécanisme de dégradation (en se fondant sur l'exemple de la fatigue thermique). Dans une troisième partie, la construction d'un réseau bayésien permettant d'évaluer l'impact d'un mécanisme sur le vieillissement du matériel est exposée. Un exemple d'utilisation de ce réseau est donné pour la fatigue thermique.

## **Chapitre 6 : Capitalisation de la démarche et des résultats de l'anticipation**

Ce chapitre propose un outil qui intervient dans toutes les phases de la démarche d'anticipation. Dans un premier temps, un état de l'art sur la capitalisation d'une manière générale est donné. Ensuite, une base de données de vieillissement : GALL, Generic Aging Lessons Learned, est décrite. Les limites et l'intérêt de cette base sont également donnés. Enfin, nous présentons la construction d'une base de données qui permet de capitaliser, d'une part les différentes phases de la démarche, et d'autre part les résultats de l'anticipation. Une structure de la base est présentée et ses différentes utilisations sont données.

## **Chapitre 7 : Validation de la démarche d'anticipation ; application à un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur**

En préambule, ce chapitre présente les critères qui ont guidé le choix de ce matériel pour l'application. Ensuite, nous décrivons le déroulement des différentes phases de la démarche, les résultats obtenus ainsi que les évolutions et les réajustements de la démarche réalisés suite à l'application pour l'adapter au contexte d'un problème réel. Finalement, nous évaluons la démarche d'anticipation développée dans ce travail de recherche, en comparant les résultats obtenus suite à l'application, d'une part avec ceux obtenus lors d'une étude moins structurée et d'autre part avec ceux donnés par la base de données GALL, Generic Aging Lessons Learned. Les documents résultant de l'application sont joints en annexe (annexes 3, 4 et 5).

## Repères typographiques

**Définition 1 :** *Les définitions issues de la documentation technique sont numérotées et présentées en italique.*

**Définition 2 :** *Les définitions apportées par ce mémoire suivent la même numérotation que les définitions issues de la documentation technique. Elles sont également présentées en italique et encadrées.*

## Abréviations

**AMDE :** Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets

**AMDEC :** Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité

**ASME :** American Society of Mechanical Engineers (code ou association, selon le contexte)

**AVISE :** Anticipation du Vieillessement par Interrogation et Stimulation d'Experts

**CPP :** Circuit Primaire Principal

**EPRI :** Electric Power Research Institute (institut de recherche américain des électriciens)

**GALL :** Generic Aging Lessons Learned (base de données)

**LCM :** Life Cycle Management

**LEP :** Ligne d'Expansion du Pressuriseur

**NRC :** Nuclear Regulatory Commission (autorité de sûreté américaine)

**OMF :** Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (ou RCM)

**PMDA- PIRT :** Proactive Materials Degradation Assessment- Phenomena Identification and Ranking Table

**PRA :** Probabilistic Risk Assessment (ou EPS)

**RB :** Réseau Bayésien

**RCM :** Reliability Centered Maintenance (ou OMF)

**REP :** Réacteur à Eau Pressurisée

**REX :** Retour d'EXpérience

**RIPBR :** Risk-Informed, Performance-Based Regulation

**STIMEX-IMDP :** STIMulation d'EXperts pour l'Identification de Mécanismes de Dégradation Potentiels

**STIMEX-IPP :** STIMulation d'EXperts pour l'Identification de Parades Potentielles

# Chapitre 1

---

## Problématique et positionnement bibliographique

---

Dans ce chapitre, nous décrivons dans une première partie la problématique de recherche et le contexte industriel de gestion de cycle de vie des composants et des systèmes dans lequel elle s'inscrit. Plusieurs définitions sont introduites, notamment celles relatives au vieillissement, à l'anticipation, au retour d'expérience et à l'expertise, qui sont des notions utilisées dans l'ensemble du mémoire.

Ensuite, nous consacrons une seconde partie au positionnement bibliographique de ce travail de recherche. Nous proposons dans ce paragraphe une typologie des méthodes de fiabilité, et nous identifions l'intérêt de chaque type de méthodes par rapport à notre problématique. Cinq démarches sont décrites pour illustrer ces différents types :

une démarche de fiabilité à la conception : l'AMDE,

une démarche de fiabilité à moyen terme : l'OMF,

trois démarches de fiabilité à long terme : les démarches LCM, RIPBR et PMDA-PIRT.

## 1.1 Problématique et définitions

Un premier paragraphe décrit le contexte industriel de ce travail de recherche, la gestion de cycle de vie. Deux aspects à considérer dans ce contexte sont présentés : la gestion du vieillissement et la gestion des coûts. Ce paragraphe aboutit au besoin traité dans cette recherche : le besoin d'anticipation. Une définition de l'anticipation dans le cadre de ce travail est alors donnée.

Un deuxième paragraphe permet de formuler la problématique et les objectifs de la recherche.

### 1.1.1 Le contexte industriel : la gestion du cycle de vie

Ce travail se situe dans le cadre de la gestion du cycle de vie (« Life Cycle Management ») des matériels (composants, systèmes ou structures) d'une installation. Une prolongation de la durée d'exploitation d'une installation, au-delà de celle prévue initialement à la conception, est parfois envisagée dans le but d'amortir encore plus l'investissement de départ. Dans ce cas, la durée d'exploitation de certains matériels, représentant de gros investissements, peut conditionner celle de toute l'installation. Si le vieillissement de ces matériels est maîtrisé et qu'ils sont donc bien maintenus, cette prolongation est alors possible. Dans ce contexte de la gestion du cycle de vie, deux aspects importants sont à considérer : la gestion du vieillissement physique du matériel et la gestion des coûts. Nous identifions alors dans ce contexte un besoin d'anticiper le vieillissement.

#### 1.1.1.1 La gestion du vieillissement physique du matériel

Le vieillissement est, selon [Lannoy et Procaccia, 2005], une dégradation physique d'un système, d'une structure ou d'un composant, due à ses conditions d'emploi ou à l'environnement dans lequel il est placé. Ces conditions peuvent engendrer des phénomènes physiques (cyclage thermique, vibrations, chargement mécanique, irradiation et réactions chimiques par exemple) qui sont responsables du vieillissement.

**Définition 1 :** *Le vieillissement est un processus par lequel les caractéristiques d'un matériel se modifient par le temps ou l'utilisation [EPRI, 1993].*

Tout composant qui vieillit subit des mécanismes de dégradation, qui agissent sur les matériaux dans des conditions particulières. Selon l'EPRI [EPRI, 1993], un mécanisme de dégradation est une altération physico-chimique des caractéristiques d'un matériau dans des conditions particulières de température, de pression ou dans un milieu chimique particulier. Cependant, nous ne voyons pas apparaître dans cette définition la notion d'évolution dans le temps. D'autre part, la norme européenne [NF EN 13306, 2001] parle plutôt de mécanisme de défaillance, défini comme suit : processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance. Nous donnons dans le cadre de ce travail la définition suivante :

**Définition 2 :** *Un mécanisme de dégradation est un processus conduisant à une altération physico-chimique dans le temps des caractéristiques d'un matériau dans des conditions particulières de température, de pression ou dans un milieu chimique particulier.*

Cette altération progressive et continue dans le temps peut provoquer la dégradation du matériau se manifestant par des effets mesurables (amorçage d'une fissure, par exemple). Au cours du temps, cette dégradation peut s'aggraver plus au moins vite (propagation de la fissure, par exemple) selon une cinétique de dégradation. A partir d'un certain seuil, cet effet du vieillissement peut provoquer une perte totale de la fonction d'un matériel (l'étanchéité d'un tuyau par exemple), c'est alors la défaillance. Cette dernière se manifeste par un mode de défaillance (une fuite, par exemple). La définition de la défaillance est donnée dans le paragraphe 1.2.2.1.

**Définition 3 :** *une dégradation est une évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'exploitation ou à une cause externe [NF EN 13306, 2001].*

**Définition 4 :** *Un effet du vieillissement est une modification nette des caractéristiques d'un matériel qui se produit avec le temps ou l'utilisation et qui est due à un mécanisme de dégradation [EPRI, 1993].*

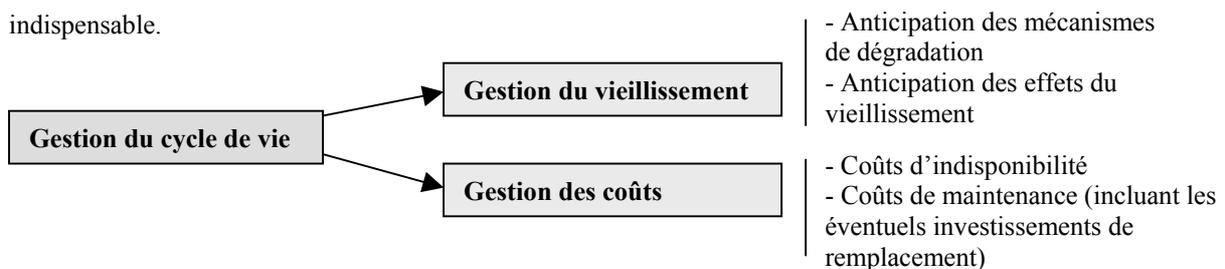
**Définition 5 :** *Un mode de défaillance est la façon par laquelle est constatée l'incapacité d'un bien à remplir une fonction requise [NF EN 13306, 2001].*

### 1.1.1.2 La gestion des coûts

Afin de maîtriser le vieillissement des installations, une maintenance efficace est indispensable. A la période de fin de vie de l'installation ou si une prolongation de la durée de d'exploitation est envisagée, l'anticipation devient indispensable. Cette anticipation consiste à identifier les problèmes liés au vieillissement et à proposer les solutions adéquates pour le maîtriser pour chaque matériel de l'installation. Une définition de l'anticipation dans le cadre de ce travail est donnée au paragraphe 1.1.1.3.

Ainsi, il faut surveiller le vieillissement et mettre en œuvre les parades nécessaires pour ralentir ou éviter ses effets ; cette maintenance engendre un coût (voir figure 1.1). Dans [Lannoy et Procaccia, 2005], les auteurs affirment que profit et sûreté vont dans le même sens : une installation sûre connaîtra moins de défaillances, donc produira plus et amènera plus de profits. Il s'agit alors d'optimiser les coûts de maintenance tout en maintenant, voire en améliorant, les objectifs de sûreté et de disponibilité [Dubreuil-Chambardel et al, 1998]. La clef de l'exploitation d'une installation vieillissante est bien évidemment la qualité de la maintenance pratiquée.

Des décisions liées au choix des solutions de maintenance à mettre en œuvre au niveau des différents matériels de l'installation, et qui engendrent un coût, par rapport aux bénéfices apportés par la prolongation de la durée d'exploitation sont à prendre. Une optimisation de ces choix au niveau de l'ensemble de l'installation est indispensable.



**Figure 1.1 : Le contexte de l'anticipation.**

La problématique de ce travail se situe dans le cadre de la gestion du vieillissement, les aspects liés à la gestion de coûts ne sont pas considérés, ils seraient à intégrer en aval de ce travail dans le cadre d'une étude technico-économique pour l'optimisation de choix de solutions permettant de maîtriser le vieillissement au niveau de l'ensemble de l'installation.

### 1.1.1.3 Le besoin d'anticipation pour la gestion du cycle de vie

Nous proposons ici une typologie des incidents industriels, ceux-ci peuvent être de différentes natures :

- ils peuvent être accidentels, dus à des agressions externes (un séisme, par exemple) ou à des incidents internes (l'explosion d'une pompe dans l'installation), ou à des erreurs humaines (en exploitation, en maintenance...)
- ils peuvent être le résultat d'erreurs de conception (ce type de défaillance apparaît souvent dès les premières années d'exploitation),
- ils peuvent être aussi le résultat du vieillissement que subit le matériel.

Comme nous nous plaçons dans un contexte de la gestion du cycle de vie, nous nous focalisons dans ce mémoire sur les défaillances imputables au vieillissement des installations. Dans ce contexte, il est indispensable d'anticiper deux types de problèmes (voir figure 1.2) :

#### - les problèmes de fin de vie

Ces problèmes peuvent apparaître notamment, de façon prioritaire, lorsque les matériels subissent des modifications de conception, d'exploitation ou de maintenance ou tout simplement des mécanismes de dégradations non identifiés lors des études précédentes peuvent apparaître.

#### - les problèmes dus à une éventuelle prolongation de la durée d'exploitation

Des problèmes autres que ceux identifiés à la conception peuvent apparaître suite à cette éventuelle prolongation de la durée d'exploitation ; il faut alors les identifier et évaluer leurs effets.

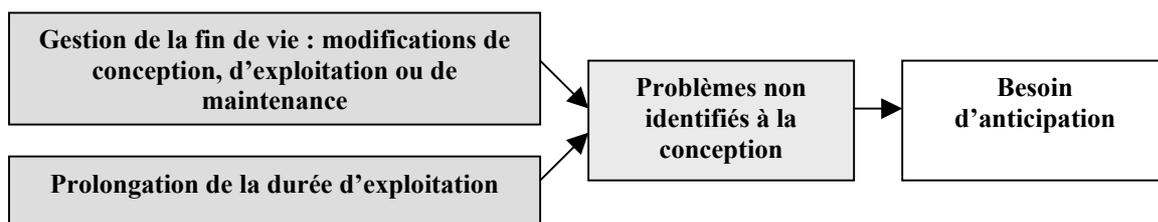


Figure 1.2 : Le besoin d'anticipation.

Dans le cadre de cette étude, nous proposons pour l'anticipation la définition suivante :

**Définition 6 :** *L'anticipation est l'identification des événements potentiellement pénalisants en termes de sûreté, de disponibilité ou de coûts, avant qu'ils ne se produisent, afin d'évaluer les risques qu'ils représentent et de préparer et mettre en œuvre les mesures ou les parades adéquates.*

## 1.1.2 La problématique

Dans l'optique de gérer la fin de vie ou de prolonger la durée d'exploitation d'un matériel, un besoin d'anticiper les problèmes liés au vieillissement et non identifiés à la conception, a été mis en évidence dans le paragraphe précédent.

Nous proposons dans ce travail d'élaborer une démarche qui permette d'anticiper les défaillances potentielles dues au vieillissement. Pour cela, plusieurs questions se posent :

- Comment intégrer les modifications de conception, d'exploitation ou de maintenance ?
- Quelles sont les autres informations nécessaires pour réaliser cette anticipation ?
- Comment anticiper les défaillances qui peuvent apparaître en fin de vie et particulièrement celles qui n'ont pas été identifiées à la conception ?
- Comment anticiper les défaillances qui peuvent apparaître pendant la période de prolongation de la durée d'exploitation ?

Pour permettre cette anticipation, nous disposons d'un certain nombre d'informations sur les défaillances potentielles du matériel déjà identifiées à la conception et sur les défaillances avérées en exploitation par le retour d'expérience. Notons enfin que traiter l'anticipation nécessite d'évaluer quantitativement les risques représentés par ces événements pénalisants indésirables, c'est-à-dire d'évaluer la probabilité qu'un mécanisme soit pertinent et la gravité associée à ce mécanisme.

### 1.1.2.1 Le besoin d'informations existantes : le retour d'expérience

Pour réaliser cette anticipation, il faut tenir compte des informations généralement existantes sur le matériel : les résultats de l'AMDE, le retour d'expérience passé, les modifications par rapport à la conception, et les conditions d'exploitation et de maintenance actuelles ou prévisionnelles.

**Définition 7 :** *Dans [Thèvenot, 1998], il est écrit qu'« exploiter le retour d'expérience, c'est analyser les succès et les échecs du passé, et introduire les leçons apprises dans les savoir-faire de l'entreprise pour, à l'avenir, garantir les succès et éviter les échecs ».*

Thèvenot classe l'analyse du retour d'expérience selon trois niveaux :

- Premier niveau : il correspond à une analyse du risque d'existence d'autres occurrences du problème observé. C'est une analyse par analogie permettant une action sur les effets.
- Deuxième niveau : il s'agit ici de remonter aux causes potentielles du dysfonctionnement. Une action corrective doit donc rendre impossible toute cause prouvée. Pour les causes potentielles, c'est en fonction du couple gravité-probabilité qu'il faut s'interroger sur les actions préventives. C'est une analyse permettant une action sur les causes.
- Troisième niveau : s'il y a dysfonctionnement, c'est que le savoir-faire n'est peut être pas satisfaisant. Dans ce cas, il faut agir sur les hommes et leur formation, la documentation normative ; c'est donc le

rôle du système qualité de l'entreprise incluant les aspects organisation et moyens. C'est une analyse permettant une action sur l'organisation.

Ce travail de recherche se situe dans les niveaux 1 et 2, puisqu'on cherche à identifier les causes de défaillances et à réduire leurs effets.

### 1.1.2.2 Le besoin d'expertise

Cette étude se situe dans un cadre particulier, celui du secteur nucléaire. Ce contexte implique plusieurs caractéristiques du matériel : des équipements spécifiques, un besoin important de sûreté, une qualité élevée de conception, et une maintenance exigeante. Ces caractéristiques impliquent un faible retour d'expérience (un faible nombre de défaillances) qui peut rendre difficile, en outre, l'analyse statistique des données.

Pour compenser ce manque d'informations, la solution « classique » consiste à recueillir le jugement d'expert. L'expertise contribue alors à compléter les données du retour d'expérience. Dans ce mémoire, nous considérons l'expert comme une source pertinente d'informations.

Si les conditions d'environnement, d'exploitation, de maintenance ou la durée d'exploitation du matériel changent par rapport à celles considérées à la conception, seule l'expertise peut permettre d'anticiper l'impact de ces changements. En s'appuyant sur les données existantes, l'expert peut identifier les défaillances potentielles qui pourraient éventuellement apparaître à la suite de ces changements. C'est donc un acteur important dans le processus d'anticipation.

**Définition 8 :** *L'expertise est une « opinion reconnue, autorisée et renseignée, fondée sur la formation, la connaissance, l'apport d'information et l'expérience d'un expert du domaine considéré, à un moment donné » [Lannoy et Procaccia, 2001].*

### 1.1.2.3 Formulation de la problématique

Dans ce travail de recherche, il s'agit de développer une démarche structurée d'anticipation des défaillances potentielles d'un matériel dues au vieillissement pour l'aide à la gestion son cycle de vie.

Cette démarche doit permettre d'anticiper les défaillances qui peuvent apparaître en fin de vie et particulièrement celles qui n'ont pas été identifiées à la conception en tenant compte des modifications de conception, d'exploitation ou de maintenance. Si une prolongation de la durée d'exploitation est envisagée, la démarche doit permettre d'anticiper les défaillances qui peuvent apparaître pendant cette période de prolongation.

Pour développer cette démarche, il est nécessaire de définir dans un premier temps les objectifs et les résultats de l'anticipation et de structurer ses étapes. La démarche d'anticipation peut s'appuyer d'une part sur les informations existantes sur le matériel et en particulier son retour d'expérience et d'autre part sur l'expertise (voir figure 1.3). Dans un deuxième temps, il s'agit donc d'identifier et de localiser ces informations existantes.

Finalement, il faut, fournir les méthodes et les outils nécessaires pour obtenir les résultats de l'anticipation en intégrant les informations existantes et en interrogeant des experts.

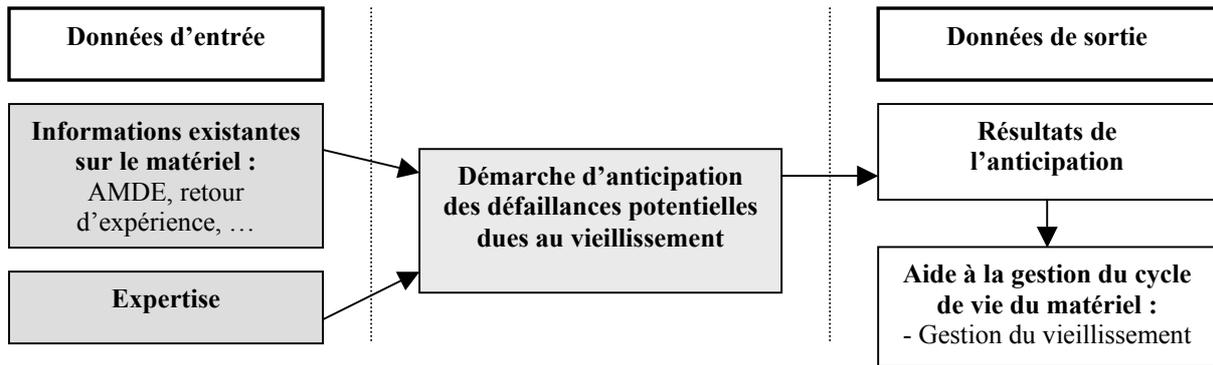


Figure 1.3 : Les données d'entrée et de sortie de la démarche d'anticipation.

## 1.2 Positionnement bibliographique

L'anticipation des défaillances, qui constitue une aide à la maintenance, permet d'assurer la fiabilité d'un système. Nous proposons donc dans le paragraphe qui suit quelques définitions concernant la maintenance, les défaillances et la fiabilité.

### 1.2.1 La maintenance

#### 1.2.1.1 Définition de la maintenance

**Définition 9** : *la maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [NF EN 13306, 2001].*

#### 1.2.1.2 Typologie de la maintenance

On distingue plusieurs types de maintenances [Monchy, 1991] :

**a - La maintenance corrective** : « opération de maintenance effectuée après défaillance ».

Cette maintenance intervient suite à des défaillances. Elle peut être :

**curative** : « intervention définitive et limitée de maintenance corrective après défaillance », c'est une remise à l'état initial du matériel (réparation) :

**palliative** : « action sur un bien en vue de le remettre provisoirement en état de fonctionnement avant réparation », c'est une remise en fonctionnement provisoire du matériel (dépannage)

ou **d'amélioration** : c'est une remise en cause du matériel pour apporter des améliorations en vue de fiabiliser son fonctionnement par rapport à ce genre de défaillances.

**b - La maintenance préventive** : « maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu »

Cette maintenance permet de prévenir les défaillances. Elle peut être :

**systematique** : « maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage », il s'agit d'interventions périodiques programmées selon les matériels.

**conditionnelle** : « maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure...) », il s'agit d'interventions qui peuvent avoir lieu suite à des alarmes fournies par des indicateurs.

ou **opportuniste** : il s'agit d'interventions suite à un constat d'usure lors d'une réparation par exemple.

### 1.2.1.3 Les cinq niveaux de maintenance

On peut classer les opérations de maintenance en fonction de leur complexité ou de leur importance et des moyens nécessaires pour leur exécution [Mercier, 1992], selon le tableau 1.1 ci dessous :

**Tableau 1.1 : Les cinq niveaux de la maintenance [Mercier, 1992].**

<b>Niveau 1</b>	Réglages simples Echange d'éléments consommables (fusibles,...) Acteur : exploitant, pas d'outillage
<b>Niveau 2</b>	Dépannages par échange standard (appareillage électrique ou de contrôle commande) Maintenance préventive mineure (graissage) Acteur : technicien moyennement qualifié, outillage portable
<b>Niveau 3</b>	Diagnostic des pannes Echanges standard (ensembles mécaniques complexes) Réparations mécaniques mineurs Acteur : technicien spécialiste Outillage particulier, documentation partielle mais détaillée
<b>Niveau 4</b>	Révisions, réparations moyennes Acteur : équipe d'encadrement technique très spécialisée Atelier et outillages spécialisés Documentation complète
<b>Niveau 5</b>	Reconstruction ou rénovation Réparation particulière importante Acteur : constructeur ou reconstruteur Moyens : définis par le constructeur, proches de la fabrication

## 1.2.2 Les défaillances

### 1.2.2.1 Définition de la défaillance

**Définition 10** : *la défaillance est la cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise [NF EN 13306, 2001].*

Ainsi, un matériel connaît une défaillance lorsqu'il n'est plus en mesure de remplir sa (ou ses) fonction(s).

### 1.2.2.2 Typologies des défaillances

Plusieurs typologies peuvent être considérées, quatre sont données dans [Zwingelstein, 1995] selon :

- les causes de défaillance (mauvais emploi, faiblesse de la conception, ...),
- les degrés de défaillance (partielle ou dégradation, totale, intermittente),
- la vitesse d'apparition (soudaine, progressive),
- les conséquences (mineure, majeur, critique, catastrophique).

Une autre typologie peut être réalisée selon la manifestation de la défaillance (évidente ou cachée).

### 1.2.2.3 L'analyse des défaillances

L'objectif de la maintenance corrective est de rétablir le matériel dans un bon état de fonctionnement. Les défaillances peuvent être aléatoires ou récurrentes. Si elles sont récurrentes, l'analyse des défaillances permettra de mettre en évidence les points faibles des matériels et d'y remédier, soit en modifiant la conception, soit en optimisant les programmes de maintenance préventive. Cette dernière a pour objectif de réduire la probabilité de défaillance. L'expert de maintenance doit donc surveiller et anticiper les évolutions des dégradations préjudiciables : faut-il y remédier immédiatement ou peut-on différer l'action de maintenance ?

Si les défaillances sont aléatoires, et si elles n'ont pas été prévues lors de la conception, il devient essentiel de les analyser, car elles peuvent mettre en évidence un événement avant-coureur, non prévu, qui peut s'avérer grave pour l'exploitation et en particulier la sécurité.

L'analyse des défaillances et des dégradations est donc essentielle, d'une part pour anticiper et détecter des problèmes potentiellement sensibles, d'autre part pour mieux concevoir et pour mieux optimiser les programmes de maintenance préventive.

Dans ce travail de recherche, comme on s'intéresse à l'anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement d'un matériel, on se place dans le contexte de la maîtrise des risques industriels et de la sûreté de fonctionnement. En effet, la sûreté de fonctionnement s'intéresse à la confiance que l'on peut placer dans un système dans l'accomplissement de ses missions, elle s'appuie donc sur l'étude du risque de défaillance. Mais comme ce travail de recherche se situe dans un contexte de gestion de cycle de vie, la notion de durée est importante, cette notion est prise en compte dans la fiabilité.

## 1.2.3 La sûreté de fonctionnement et la fiabilité

Les définitions de la sûreté de fonctionnement et de la fiabilité sont données au début de ce paragraphe. L'intérêt à évaluer la fiabilité d'un système est ensuite présenté à plusieurs niveaux et un bref historique des premiers domaines d'application est donné.

### 1.2.3.1 Définition de la sûreté de fonctionnement

**Définition 11 :** *Dans [Villemeur, 1988], la sûreté de fonctionnement est définie comme étant l'aptitude d'une entité à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle s'appuie sur quelques concepts dont la fiabilité.*

### 1.2.3.2 Définition de la fiabilité

Le terme fiabilité a été introduit dans les années 60 pour traduire le terme anglo-saxon «reliability». Elle est présentée dans [Peyrache, 1968] comme la Science des défaillances. La norme européenne en donne la définition suivante :

**Définition 12 :** *La fiabilité est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné [NF EN 13306, 2001].*

Nous remarquons, dans cette définition de la fiabilité, que la notion de durée est introduite par rapport à la définition de la sûreté de fonctionnement. C'est cette notion qui nous intéresse dans le cadre de la gestion de cycle de vie des installations.

### 1.2.3.3 L'intérêt à évaluer la fiabilité d'un système

Dans [Pagès et Gondran, 1980], l'intérêt que l'on peut avoir à évaluer la fiabilité d'un système est présenté à plusieurs niveaux :

- au niveau de la conception, il est important de disposer de méthodes permettant de prévoir la fiabilité pour répondre à un cahier des charges, choisir des solutions homogènes, réaliser un objectif au coût minimum (une meilleure fiabilité accroît les coûts de production mais permet des économies en exploitation) ;
- au niveau de la fabrication, il sera nécessaire de vérifier que les composants fabriqués ou employés répondent bien aux caractéristiques retenues lors de la conception ;
- au niveau de l'exploitation, il est intéressant à plusieurs titres de contrôler les prévisions en matière de fiabilité :
  - o vérifier que le système se comporte normalement et, sinon, trouver la cause des anomalies.
  - o améliorer la connaissance des données de fiabilité. De plus, les contraintes de fiabilité peuvent avoir une incidence sur l'exploitation du matériel par l'introduction de certaines procédures de tests ou par la nécessité de gérer un stock de pièces de sécurité.

### 1.2.3.4 Un bref historique des premiers domaines d'application de la fiabilité

Dans [Kline et al, 1978], on trouve une analyse intéressante de nombreux articles et livres consacrés aux différents aspects de la fiabilité en fonction de différents critères et notamment en fonction des domaines d'application. Les transports aériens et les communications dans les années 50, puis à partir des années 1960 l'aérospatiale ont fait l'objet d'un grand nombre de publications. A partir des années 70, la production d'énergie électrique semble avoir pris le relais, en relation avec le développement de l'énergie nucléaire.

### 1.2.3.5 Typologie des méthodes de fiabilité

Nous distinguons trois types de méthodes de fiabilité :

**1- La fiabilité à la conception** : ces méthodes permettent d'explicitier les défaillances potentielles pour toute la durée d'exploitation d'un système et ce, dès la conception compte tenu du cahier des charges et du profil d'exploitation envisagé. Il existe plusieurs méthodes permettant cette analyse. La méthode la plus utilisée est l'AMDE, l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets. Les résultats de ces méthodes constituent une donnée d'entrée de la démarche d'anticipation puisqu'ils indiquent les défaillances potentielles du système identifiées à la conception. La méthode AMDE est décrite ci-dessous (voir paragraphe 1.2.4)

**2- La fiabilité à moyen terme** : ce sont des études de fiabilité en cours d'exploitation qui permettent d'intégrer aux études réalisées à la conception les données du retour d'expérience et donc les défaillances avérées. La méthode RCM, Reliability Centered Maintenance (adaptée à EDF en OMF, Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité) est un exemple de méthode de fiabilité à moyen terme, elle peut être actualisée périodiquement (tous les 5 à 10 ans, par exemple). La méthode OMF contribue bien évidemment à combattre le vieillissement. Une présentation de cette méthode est donnée ci-dessous (voir paragraphe 1.2.5)

**3- La fiabilité à long terme** : ces méthodes s'intéressent aux défaillances potentielles pour toute la durée d'exploitation du système et particulièrement celles dues au vieillissement ou qui peuvent apparaître à la période de fin de vie. Contrairement à celles utilisées à la conception, les méthodes de fiabilité à long terme bénéficient du retour d'expérience du système depuis l'instant T0 de mise en service jusqu'à l'instant présent d'observation T. Ces méthodes permettent de prendre en considération les changements dans les conditions et les paramètres d'exploitation, les modifications des programmes de maintenance et le changement de la durée d'exploitation prévisionnelle. Nous présentons ci-après, une méthode développée par l'EPRI, l'institut de recherche américain des électriciens : LCM et deux méthodes américaines en cours de développement relatives à l'anticipation: RIPBR développée par le M.I.T. et PMDA-PIRT développée par la NRC, l'autorité de sûreté nucléaire américaine.

### 1.2.4 La fiabilité à la conception : exemple de l'AMDE

L'AMDE est une technique d'analyse inductive et systématique des défaillances des systèmes industriels, permettant leur hiérarchisation et la recherche d'améliorations adaptées. Cette méthode fait appel aux compétences pluridisciplinaires d'un groupe de travail. L'AMDEC est une AMDE, Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets, complétée par une analyse de criticité. FMECA, Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, et FMEA, Failure Mode and Effects Analysis sont les sigles anglo-saxons correspondants.

Selon les objectifs visés, plusieurs types d'AMDE sont utilisés lors des phases successives de développement d'un produit : AMDE produit, AMDE processus, AMDE machine. Mais l'AMDE est généralement utilisée dès le stade de la conception.

### 1.2.4.1 Les domaines d'application de l'AMDE [Villemeur, 1988]

La méthode AMDE fut employée pour la première fois à partir des années 1960 dans le domaine de l'aéronautique pour l'analyse de la sécurité des avions [Recht, 1966]. Depuis l'utilisation de cette méthode s'est généralisée dans de très nombreux domaines industriels :

- Cette méthode est réglementaire dans le cadre de l'étude de la sécurité des avions aux Etats-Unis et en France, notamment elle le fut pour les avions Concorde et Airbus [Lievens, 1976]. Elle a également servi comme méthode de base dans l'analyse de sécurité du module lunaire LEM [Bussolini, 1971].
- Elle a été recommandée dans le domaine nucléaire aux Etats-Unis après l'accident de la centrale de Three Mile Island [PRA, 1982].
- De nombreux textes officiels et « standards » existent à son propos : les « Military standards » des Etats-Unis, le document émis par l'« Institute of Electrical and Electronics Engineers » (IEEE) [IEEE, 1975].
- Dans le cadre de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), une norme internationale a été publiée sur cette méthode [CEI, 1985].
- Il existe une très abondante littérature relative à cette méthode et à ses applications. Initialement dans les domaines traditionnels de l'aéronautique, du spatial, du nucléaire, puis dans la chimie [King et Rudd, 1971],[Lees, 1980] et d'autres domaines comme l'automobile [Yamada, 1977] depuis quelques années.
- A Electricité de France, cette méthode est très largement utilisée pour l'analyse de la sûreté de fonctionnement des systèmes de sûreté et des systèmes de production des centrales nucléaires et dans le cadre OMF [Barbet et al, 1980].

### 1.2.4.2 Les différentes phases de l'AMDE [Signoret, 2002], [Villemeur, 1988]

#### **Phase 1 : Définition du système, de ses fonctions et de ses composants**

Cette première phase consiste à définir le système à étudier et ses fonctions. Les divers états de fonctionnement du système doivent être établis. Notons que le système peut avoir plusieurs positions dans son cycle de vie et donc des environnements et des fonctions différentes.

#### **Phase 2 : Analyse qualitative des dysfonctionnements**

Lors de cette phase, il s'agit d'identifier les mécanismes de défaillance de manière exhaustive pour chaque élément du système :

- les modes de défaillance potentiels ou réels,
- les causes possibles,
- les effets sur le système et sur l'utilisateur,
- les moyens de détection.

#### **Phase 3 : Evaluation de la criticité**

Il s'agit ici d'affecter un niveau de criticité à chaque défaillance afin de déterminer les défaillances critiques.

Deux ou trois critères peuvent définir cette criticité :

- F (ou O) : la fréquence d'apparition de la défaillance,
- G (ou S) : la gravité des effets de la défaillance,
- D (ou N) : la probabilité de non-détection de la défaillance.

**Phase 4 : Proposition d'actions correctives**

Il s'agit, lors de cette phase, de diminuer la criticité des défaillances en agissant sur un ou plusieurs des critères F, G, et D. Il faut alors rechercher les actions à engager (prévention de la défaillance, détection de la cause et du mode, réduction des effets) et évaluer la nouvelle criticité.

**Phase 5 : Synthèse de l'étude/ Décisions**

Lors de cette dernière phase il s'agit d'effectuer un bilan et de lancer les actions à effectuer (choisir les actions à engager, fixer les délais et désigner les responsables).

**1.2.4.3 Points forts et points faibles de l'AMDE**

- L'AMDE est un outil d'aide à la conception. C'est une méthode qui s'avère extrêmement puissante, à condition de ne pas sortir des limites dans lesquelles elle doit être menée.
- La méthode ne donne aucun moyen d'identifier les défaillances potentielles. Elle s'appuie uniquement sur l'avis du groupe d'experts à la conception et sur le retour d'expérience en exploitation.
- L'AMDE ne permet pas de prendre en compte l'enchaînement des causes et des conséquences. Elle constitue une analyse préliminaire qui doit généralement être complétée par l'utilisation d'autres méthodes comme le Diagramme Causes-Conséquences.

**1.2.5 La fiabilité à moyen terme : exemple, la démarche OMF**

OMF, Optimisation de la Maintenance par la fiabilité (OMF étant l'adaptation à EDF de la RCM, Reliability Centered Maintenance) est une démarche globale d'analyse des défaillances et d'optimisation de la maintenance préventive. Elle permet de choisir la meilleure politique de maintenance, d'optimiser les programmes de maintenance préventive en prenant en compte le retour d'expérience technico-économique des équipements [Dubreuil - Chambardel et al, 1998].

**1.2.5.1 Les domaines d'application de la démarche OMF**

Cette méthode a vu le jour dans l'industrie aéronautique civile et militaire américaine des années 1980, sous le nom de RCM, Reliability Centered Maintenance, dans le but de maîtriser les coûts d'exploitation des avions dans un contexte de plus en plus concurrentiel de cette industrie [Dubreuil - Chambardel et al, 1998]. En 1989, un projet de recherche [Jacquot et al,1991][Jacquot et al,1994] a été engagé par EDF afin de développer la méthode et de l'appliquer, pour validation, à deux systèmes de centrales nucléaires. La méthode OMF, Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité, ayant été ainsi développée et ayant montré son applicabilité, il a été décidé de la généraliser aux systèmes les plus importants pour les enjeux de sûreté de disponibilité et de coûts des centrales nucléaires REP des paliers 900 MW et 1300 MW [Hutin et Villemeur, 1995]. Cette méthode initialement mise en œuvre pour la maintenance des composants actifs est maintenant étendue aux structures passives, dont la particularité est, un retour d'expérience très faible [Lannoy, 2004] [Hutin et Villemeur, 1995].

**1.2.5.2 Les différentes phases de la démarche OMF**

La démarche se décline en quatre phases (voir figure 1.4)

### Phase 1 : la recherche des matériels critiques

En partant d'une division logique d'un système en groupements fonctionnels, il s'agit d'identifier les matériels qui peuvent s'avérer critiques vis-à-vis de la sûreté, de la disponibilité ou des coûts induits, puis de les sélectionner en fonction de leur niveau de criticité.

### Phase 2 : l'analyse des défaillances des matériels critiques

Pour les matériels critiques, les causes et les modes de défaillance associés sont identifiés et hiérarchisés. Ainsi on peut identifier les défaillances significatives pour ces matériels critiques.

### Phase 3 : l'analyse du retour d'expérience

La recherche des matériels critiques (phase 1) puis des défaillances significatives (phase 2) et la sélection des tâches de maintenance (phase 4) nécessitent une connaissance des mécanismes de dégradation conduisant éventuellement aux défaillances. Pour ce faire, on exploite les données archivées dans les différentes bases de données nationales et locales du retour d'expérience technique.

### Phase 4 : la sélection des tâches de maintenances

Les phases précédentes ont permis de répondre a priori à la question fondamentale : sur quels matériels et pour prévenir quelles défaillances doit-on faire de la maintenance préventive ? Il s'agit alors de déterminer les tâches de maintenance et le programme qui y répond de manière optimale.

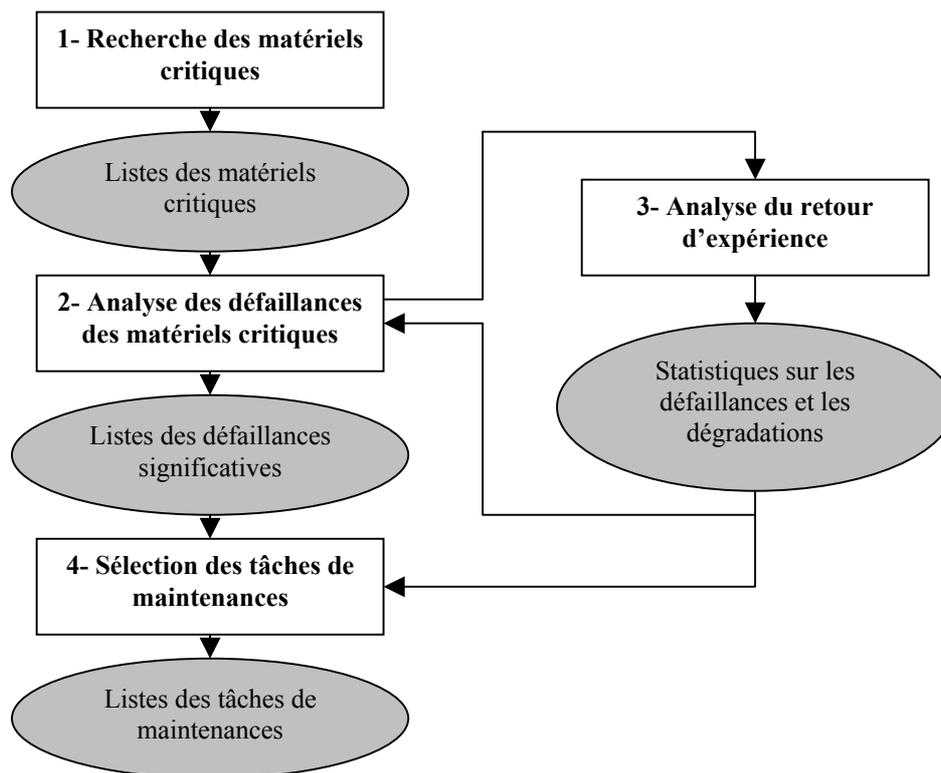


Figure 1.4 : Les quatre grandes phases de la démarche OMF.

#### 1.2.5.3 Points forts et points faibles de la démarche OMF

- La démarche OMF s'inscrit dans une démarche de recherche d'une meilleure qualité d'exploitation. Elle permet de rationaliser les pratiques de maintenance [Dubreuil - Chambardel et al, 1998]. Elle permet de combattre le vieillissement par des mesures appropriées.

- Comme l'AMDE, la méthode OMF ne donne aucun moyen d'identifier les défaillances potentielles. Elle se base sur les défaillances identifiées à la conception et les complète par les défaillances avérées du retour d'expérience.

## **1.2.6 La fiabilité à long terme : premier exemple, la démarche LCM**

La démarche LCM, Life Cycle Management, a été développée à la fin des années 1990 par l'EPRI (Electric Power Research Institute) aux Etats Unis [Sliter et al, 2000], [Sliter et al, 2001], [Sliter et Gregor, 2001], [Sliter, 2003]. C'est une méthode de gestion du cycle de vie des matériels des centrales nucléaires. LCM permet la gestion du vieillissement et de l'obsolescence des systèmes, structures et composants les plus importants pour la durabilité en excluant a priori les problématiques liées à la sûreté (la durée de vie des composants critiques pour la sûreté est tranché dans les dossiers de renouvellement de licence, « Licence Renewal »).

Cette démarche fournit aussi une solution optimale pour la gestion du cycle de vie du matériel sur la base d'une comparaison technico-économique entre différentes solutions possibles. Elle permet de maximiser la valeur de la tranche nucléaire (en réduisant les coûts) tout en assurant le niveau de sûreté. Elle est systématiquement utilisée sur les tranches nucléaires ayant reçu une autorisation de prolongation de l'exploitation de 40 à 60 ans.

### **1.2.6.1 Les domaines d'application de la démarche LCM**

LCM est utilisée dans l'élaboration de plans de gestion de cycle de vie pour de nombreuses centrales nucléaires américaines.

### **1.2.6.2 Les différentes phases de la démarche LCM**

1. Identification des compétences (analystes et experts) pour le planning LCM.
2. Identification des sources de données et des bases de données disponibles.
3. Collecte des informations spécifiques à l'installation étudiée.
4. Comparaison des données spécifiques et des conditions de fonctionnement de la tranche étudiée aux données génériques de la méthode.
5. Identification des mécanismes et des conditions de vieillissement spécifiques à la tranche étudiée.
6. Comparaison et évaluation des situations d'obsolescence dans la tranche.
7. Corriger les écarts de la tranche par rapport aux différentes situations génériques.
8. Collecte des données pour l'évaluation économique
9. Rédaction des conclusions pour l'aide à la prise de décision.
10. Planning LCM de la tranche et des systèmes, structures et composants étudiés.

### **1.2.6.3 Points forts et points faibles de la démarche LCM**

- LCM permet d'assurer le fonctionnement des installations jusqu'à 60 ans d'âge à moindre coût, grâce à une évaluation économique des différentes solutions possibles.
- C'est une démarche structurée, simple d'utilisation et effectivement appliquée [Lannoy et al, 2003].

- Dans le cadre de la méthode LCM, l'identification des mécanismes de vieillissement se base sur des situations génériques et laisse peu de place à l'anticipation de nouveaux mécanismes potentiels.

### **1.2.7 La fiabilité à long terme : deuxième exemple, la démarche RIPBR**

La démarche RIPBR, Risk-Informed, Performance-Based Regulation, est développée depuis 1995 par le Department of Nuclear Engineering, MIT, aux Etats-Unis [Golay, 2000]. Contrairement aux méthodes classiques dites « prescriptives » qui dressent des listes de consignes ou de recommandations à respecter pour la sûreté nucléaire de manière systématique, la méthode RIPBR permet d'établir un compromis entre l'amélioration de la sûreté et la réduction des coûts.

Cette recherche de compromis est faite sur la base d'expertise. Cette méthode permet une meilleure compréhension des modes de défaillance et des mécanismes de dégradation, une meilleure estimation des taux de défaillances avec leurs incertitudes. C'est, cependant, une démarche encore en évolution.

#### **1.2.7.1 Les domaines d'application de la démarche RIPBR**

- Optimisation de la performance en sûreté nucléaire (projet « maintenance rule », de la NRC).
- Optimisation des tests de confinement nucléaire, NRC.

#### **1.2.7.2 Les différentes phases de la démarche RIPBR**

1. Identification et description du changement à introduire
2. Analyse du changement proposé : par expertise et par utilisation de modèles PRA (Probabilistic Risk Assessment).
3. Description de la mise en œuvre du changement proposé.
4. Mise en place effective du changement proposé.

#### **1.2.7.3 Points forts et points faibles de la démarche RIPBR**

- Cette démarche est orientée vers une amélioration de la performance grâce à la recherche d'un équilibre entre les efforts de sûreté et la maîtrise des coûts.
- La méthode ne permet pas de traiter le manque de données sur les taux de défaillance des composants et de compréhension concernant les mécanismes de dégradation.
- Il y a un besoin d'anticipation des défaillances potentielles pour valider ou envisager des cycles de surveillance plus longs.
- La méthode ne permet pas de résoudre les difficultés de la modélisation et de l'intégration du facteur humain et de traitement des incertitudes concernant les taux de défaillance.

## 1.2.8 La fiabilité à long terme : troisième exemple, la démarche PMDA-PIRT

La démarche PMDA-PIRT, Proactive Materials Degradation Assessment- Phenomena Identification and Ranking Table, identifiée en janvier 2004 [NRC, 2004a], [NRC, 2004b], est en cours de développement depuis 2003 par l'autorité de sûreté nucléaire américaine l'US-NRC (Nuclear Regulatory Commission). C'est une démarche d'anticipation des mécanismes de dégradation impliqués dans le vieillissement des composants des centrales nucléaires, qui correspond bien à notre problématique.

Les objectifs de cette méthode sont :

- identifier et hiérarchiser des mécanismes de dégradation susceptibles d'affecter les matériels critiques des centrales,
- évaluer l'efficacité des inspections périodiques, ou mettre en œuvre des nouvelles procédures de maintenance corrective ou de remplacement,
- permettre une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation avérés, mais aussi potentiels.

### 1.2.8.1 Le contexte de développement de la démarche PMDA-PIRT

1- La réponse réactive à l'apparition de plusieurs défaillances dues aux mécanismes de dégradation

- affecte la sûreté des systèmes,
- engendre une perte de coûts et de temps,
- peut affecter l'image de la sûreté des installations nucléaires.

2- Les centrales nucléaires américaines, pour prolonger leur durée d'exploitation jusqu'à 60 ans, entreprennent une démarche de renouvellement de licences.

- Les mécanismes avérés sont des facteurs importants de la sûreté, mais d'autres mécanismes peuvent aussi apparaître.
- La surveillance de l'apparition ou de l'évolution d'un mécanisme de dégradation est essentielle pour garantir l'installation en fin de vie.

Afin d'apporter une réponse à ces deux points, la problématique de la démarche PMDA-PIRT consiste à développer une démarche permettant d'anticiper les mécanismes de dégradation.

### PIRT, l'approche proposée

Pour répondre à cet objectif, l'approche PIRT, déjà existante, est proposée. Cette approche, développée par la NRC, a été utilisée pour identifier des scénarios de dégradation et pour identifier les systèmes, matériels, processus et phénomènes impliqués dans ces scénarios. Elle est organisée en 9 phases données ci-dessous.

### 1.2.8.2 Les phases de l'approche PIRT

- 1- La problématique : l'anticipation des mécanismes de dégradation potentiels pour les centrales nucléaires.
- 2- Les objectifs : identification des matériels critiques des centrales PWR et BWR, identification des mécanismes de dégradation relatifs à chaque matériel et classification de ces mécanismes.
- 3- Collecte, évaluation et utilisation des informations existantes

4- Installations et scénarios : identification des systèmes et des matériels critiques et description pour chaque matériel des conditions d'exploitation, matériaux, milieux, ...

Un matériel et l'ensemble des informations le concernant forment un scénario.

5- Critères d'évaluation

a- quelle est la probabilité d'occurrence de la dégradation ?

b- à quel âge de l'installation la dégradation va-elle s'amorcer ?

c- quelle est la probabilité de fissure après l'amorçage ?

6- Identification des mécanismes

- Identification d'une liste globale (« master list ») de mécanismes de dégradation

- Association d'un ou de plusieurs mécanismes aux composants critiques

- Justification de l'association

7- Classification des mécanismes selon les critères d'évaluation

8- Évaluation des connaissances

9- Documentation

### **1.2.8.3 Points forts et points faibles de la démarche PMDA-PIRT**

- Cette démarche permet d'anticiper des mécanismes de dégradation impliqués dans le vieillissement des composants des centrales nucléaires. Elle permet d'établir un compromis entre l'amélioration de la sûreté et la réduction des coûts.
- PMDA-PIRT traite, lors d'une même procédure, de l'ensemble des matériels critiques d'une installation. Ceci implique de grands efforts de mise en œuvre. De plus, le choix des experts susceptibles de maîtriser l'ensemble des matériels critiques n'est pas évident. D'autre part, traiter lors d'une seule réunion l'identification des mécanismes de dégradation potentiels pour l'ensemble des matériels critiques semble une tâche lourde et difficile à réaliser de manière pertinente.
- Cette méthode est en cours de développement depuis 2003 et il n'y a donc pas de retour pour l'instant sur son application et sur son efficacité.

## **Conclusion**

Dans une première partie de chapitre, le contexte industriel et la problématique de ce travail de recherche sont exposés. Cette problématique consiste à développer une démarche globale d'anticipation des défaillances potentielles d'un matériel dues au vieillissement, s'appuyant sur l'analyse du retour d'expérience et l'expertise.

Une deuxième partie donne une étude bibliographique sur la maintenance, les défaillances et la fiabilité. Différentes méthodes de fiabilité (comme l'AMDE et la démarche OMF) peuvent s'avérer utiles pour l'anticipation. Cette bibliographie a mis aussi en évidence quelques démarches utilisées aux Etats-Unis pour maîtriser le vieillissement des centrales nucléaires. La démarche LCM, très structurée, est effectivement utilisée, mais elle laisse peu de place à l'anticipation. La méthode PMDA-PIRT réalise l'anticipation, elle est concurrente de notre démarche, mais elle est encore au stade expérimental et non appliquée.

Les méthodes classiques de surveillance, d'analyse du retour d'expérience et d'optimisation de la maintenance préventive, montrent leurs limites dans le contexte actuel de vieillissement des installations, qu'il convient d'évaluer et de maîtriser afin de garantir la sûreté et la disponibilité. D'autre part, et pour des raisons concurrentielles, il est de plus en plus important de maîtriser les coûts, ceux de maintenance plus particulièrement, et d'augmenter la rentabilité des installations en prolongeant leur durée d'exploitation. Le besoin d'anticipation est donc manifeste. C'est pour répondre à ce besoin que plusieurs démarches sont en cours de développement (comme la démarche PMDA-PIRT ci-dessus ou celle développée dans ce travail de recherche).

Une solution plus coûteuse à cette problématique du vieillissement, consiste à procéder à des remplacements massifs afin de se prémunir contre des risques potentiels. Ce choix est retenu par de nombreux exploitants américains qui remplacent certains matériels avant d'avoir vu la moindre amorce de dégradation.



## Chapitre 2

---

### Construction de la démarche AVISE

---

Cette partie illustre la construction de la démarche globale d'anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement, pour un matériel donné, dans le contexte de la gestion du cycle de vie.

Dans un premier paragraphe, nous définissons le terme « matériel ». Deux types de matériels sont alors distingués : les matériels passifs et les matériels actifs. La notion de matériel critique est également introduite.

Nous présentons ensuite les différents acteurs concernés par la démarche d'anticipation : l'analyste qui conduit la démarche, l'expert qui est source de connaissances et fournisseur de la démarche, et enfin le décideur qui est le client et l'utilisateur des résultats. Nous identifions également les flux d'information qui circulent entre ces différents acteurs.

Dans un troisième paragraphe, en partant de la définition même de l'anticipation, nous identifions les différentes étapes d'un processus d'anticipation. Nous intégrons ensuite ce processus dans une démarche globale d'anticipation, intitulée AVISE, Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts.

Un dernier paragraphe décrit les différentes phases de la démarche et présente un choix justifié d'outils ou de méthodes pour chacune d'entre elles.

## 2.1 Le matériel dans la démarche d'anticipation

Un matériel est défini dans le cadre de ce travail comme un système regroupant un ensemble de composants et accomplissant une ou plusieurs fonctions globales dans une installation donnée.

### 2.1.1 Les matériels passifs et les matériels actifs

Il est possible de distinguer deux types de matériels :

- **Le matériel passif** est un matériel structurel de l'installation qui ne comporte pas de composants dynamiques. Généralement, il ne subit qu'un nombre limité de mécanismes de dégradation. La cinétique de dégradation est plutôt lente et progressive. Si le matériel est non remplaçable, sa durée de vie peut conditionner celle de l'installation. Le remplacement d'un tel matériel ne peut être que ponctuel et exceptionnel.
- **Le matériel actif**, au contraire, subit une usure relativement importante, souvent plus rapide, due à plusieurs mécanismes de dégradation conjugués. Il est sujet à des opérations de maintenance préventive, certaines pouvant être des remplacements.

Nous présentons dans le tableau 2.1 une comparaison entre les matériels actifs et les matériels passifs par rapport à plusieurs critères : les défaillances, l'analyse des défaillances, la maintenance, l'exploitation et finalement l'anticipation.

**Tableau 2.1 : Comparaison actifs/passifs.**

#### Par rapport aux défaillances

Actifs	Passifs
Beaucoup de défaillances	Pas ou peu de défaillances
Beaucoup de mécanismes de dégradation	Un ou quelques mécanisme(s) de dégradation
Cinétique rapide	Cinétique lente
Un mode est le résultat de plusieurs mécanismes de dégradation.	Un mode par mécanisme généralement.

#### Par rapport à l'analyse des défaillances

Un retour d'expérience important.	Un retour d'expérience faible voire inexistant.
Modélisation statistique (problème de détection du vieillissement)	Modélisation physique ou analyse de fiabilité des structures (problème d'estimation de la loi de dégradation)

#### Par rapport à la maintenance

Surveillance des paramètres caractéristiques du vieillissement et des paramètres de fiabilité	Inspections en service
Optimisation des programmes de maintenance par l'OMF (voir paragraphe 1.2.5)	Optimisation dans le cadre de la méthode OMF, sur la base d'une loi de dégradation ou de l'expertise.
Maintenance courante : elle a un horizon de planification à plus ou moins long terme (l'année, 5 à 10 ans pour une étude OMF). Elle se manifeste sous la forme de maintenance préventive ou de maintenance corrective selon la criticité [Cordier, 1995].	Maintenance exceptionnelle : elle constitue un ensemble d'interventions généralement préventives, non répétitives, à caractère potentiellement générique et avec un poids économique fort en terme de coûts [Billy, 1999].
Remplacement « aisée » (faible indisponibilité, faible dosimétrie)	Remplacement difficile (arrêt de l'installation, dosimétrie forte)
Obsolescence	Pas d'obsolescence généralement

**Par rapport à l'exploitation**

Durée de vie annoncée relativement courte (30 ans typiquement)	Durée de vie longue (50 – 60 ans, voire plus)
--	---

**Par rapport à l'anticipation**

L'anticipation se fait lors de l'application de la méthode OMF, à un horizon court (3 à 5 ans).	Ces composants nécessitent une démarche d'anticipation spécifique. Elle doit inclure la période d'exploitation envisagée au-delà de la durée de vie prévue à la conception.
---	---

A la lecture de ce tableau, il ressort que l'anticipation paraît plus adaptée aux matériels passifs. Pour les matériels actifs, leur état étant contrôlé périodiquement lors des opérations de maintenance préventive, les besoins d'anticipation sont faibles. Toutefois, certains matériels actifs, importants pour la sûreté ou critiques du point de vue des coûts de disponibilité et de maintenance peuvent également mériter une anticipation à long terme. En effet, la durée de vie de certains composants structurels d'un matériel actif peut conditionner celle du matériel. Ces composants structurels peuvent alors être assimilés à des matériels passifs nécessitant une anticipation (les volutes d'une pompe primaire d'un réacteur nucléaire, par exemple).

Cependant, pour ces matériels, il est très difficile d'identifier le(s) mécanisme(s) de dégradation à l'origine de la défaillance. On tente alors d'identifier et d'anticiper les modes de dégradation ou de défaillance, un mode pouvant être occasionné par un ou plusieurs mécanismes.

### 2.1.2 Les matériels critiques

Il est important de définir les matériels concernés par la démarche d'anticipation : les matériels critiques. En effet, dans une installation, l'anticipation concerne des matériels spécifiques, sur lesquels on dispose d'un faible retour d'expérience et qui présentent un haut niveau de criticité en termes de sûreté, de disponibilité et de coûts.

Dans le cadre de la démarche PMDA- PIRT [NRC, 2004] (voir paragraphe 1.2.8), tous les matériels critiques sont traités simultanément, lors d'une même procédure. Nous pensons que cela représente un travail trop lourd pour l'analyste et le groupe d'experts qui l'aident. Ceci constitue une grande contrainte pour l'applicabilité de la démarche. D'autre part, l'analyste ne peut s'appropriier l'ensemble des informations relatives à tous ces matériels critiques et court ainsi le risque de passer à côté d'indicateurs déterminants pour l'anticipation. Finalement, dans le panel d'experts interrogés, il est presque impossible d'inclure un expert par matériel critique étudié (nombre trop élevé et experts très difficiles à réunir). Or la présence de ces experts est fondamentale pour comprendre le fonctionnement du matériel et les conditions dans lesquelles il évolue. Toutes ces raisons conduisent à définir une démarche d'anticipation qui traite un matériel à la fois, qui permet ainsi de diminuer le risque de passer à côté de problèmes potentiels et qui demande moins d'effort de mise en œuvre.

## 2.2 Les acteurs et les flux d'information dans la démarche d'anticipation

Dans une démarche d'anticipation, il est essentiel de pouvoir identifier les informations nécessaires, qui constituent une donnée d'entrée à la démarche. Nous les appelons « informations pour l'anticipation ». Il est également important de définir clairement les objectifs de la démarche et les résultats que l'on désire obtenir en sortie. Ces résultats étant destinés aux décideurs, nous les appelons « informations pour l'aide à la décision » (voir figure 2.1).



Figure 2.1 : Informations relatives à la démarche d'anticipation.

L'acteur, conduisant une démarche qui s'appuie sur l'interrogation d'experts, est communément appelé « analyste ». Comme c'est le cas dans la démarche d'anticipation, nous adoptons cette appellation pour l'acteur qui conduit l'exercice d'anticipation. L'analyste est amené dans l'application de la démarche à interroger des « experts ». Les résultats de la démarche d'anticipation étant destinés à aider à la décision, l'analyste doit les transmettre à un décideur. Trois types d'acteurs sont donc identifiés dans le processus d'anticipation : l'analyste, l'expert et le décideur. D'autre part, il faut pouvoir déterminer les flux d'informations qui circulent entre ces différents acteurs (voir figure 2.2).

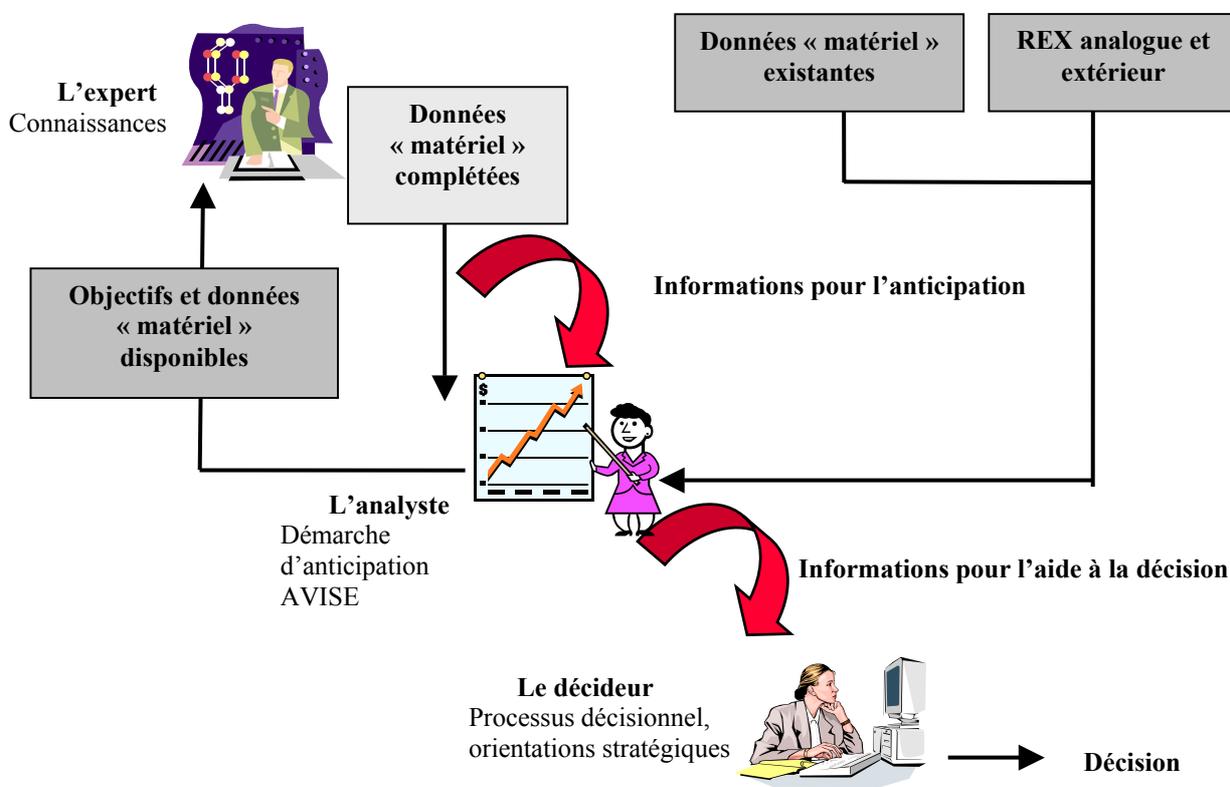


Figure 2.2 : Les acteurs et les flux d'informations dans la démarche d'anticipation.

**L'analyste** est celui qui conduit l'exercice d'anticipation. Il a pour rôle de définir la problématique et les objectifs de la démarche, de collecter les informations nécessaires, de les communiquer aux experts et de les interroger pour obtenir les résultats attendus de l'anticipation. Ces résultats sont alors synthétisés et capitalisés pour l'aide à la décision.

**L'expert** est celui qui détient la connaissance et qui a l'aptitude d'anticiper les défaillances. Pour cela, l'analyste met à sa disposition un certain nombre d'informations, de méthodes et d'outils pour l'aider à exprimer ces connaissances.

**Le décideur** est celui qui, à partir des informations de synthèse fournies par l'analyste, choisit les « meilleures » solutions, en s'appuyant sur des processus décisionnels en adéquation avec les orientations stratégiques de l'entreprise. Ces « meilleures » solutions doivent être prises en considérant les résultats de l'anticipation de tous les matériels critiques afin de les optimiser par rapport à l'ensemble de l'installation. Il s'agit bien souvent de compromis.

## 2.3 Identification du processus d'anticipation

Une approche descendante est adoptée pour aborder la problématique de l'anticipation. Afin de construire une méthodologie d'anticipation des défaillances potentielles, nous nous sommes basé sur la définition même de l'anticipation (voir paragraphe 1.1.1.3). Cette définition implique un processus à suivre pour anticiper un événement :

- identifier les événements pénalisants potentiels,
- évaluer les risques : leurs conséquences et leur criticité,
- préparer et mettre en œuvre les mesures adéquates : les parades potentielles.

Comme on se place dans un contexte de gestion du cycle de vie, on se focalise sur l'anticipation des défaillances dues au vieillissement des installations. En effet, tout composant qui vieillit, subit des mécanismes de dégradation qui agissent sur les matériaux dans des conditions particulières. Les matériels passifs, par exemple, peuvent être soumis au mécanisme de fatigue thermique.

Ainsi, afin d'anticiper une défaillance due à un vieillissement, il faut identifier le mécanisme de dégradation qui peut être à son origine. Un mécanisme potentiel pour un matériel donné est un mécanisme qui peut amorcer une dégradation sur ce matériel.

Comme l'anticipation s'applique dans un contexte de gestion du cycle de vie, il faut aussi juger de la pertinence des mécanismes potentiels identifiés à l'horizon d'exploitation envisagé. Un mécanisme potentiel est alors jugé pertinent s'il peut amorcer une dégradation pendant la durée d'exploitation envisagée. Mais ces mécanismes potentiels pertinents, ne sont pas tous critiques pour le fonctionnement du matériel. Certains n'évoluent pas rapidement (cinétique lente) et ne conduisent donc pas à une défaillance pendant la durée d'exploitation. D'autres, n'engendrent pas de conséquences graves. D'autres enfin sont maîtrisés par la maintenance existante. Une analyse des mécanismes potentiels est donc nécessaire pour identifier ceux qui sont critiques et pour

lesquels il faut proposer des solutions. C'est alors qu'on peut identifier les mesures à mettre en œuvre pour éviter ou ralentir l'apparition des mécanismes critiques. Mais dans un contexte de gestion de cycle de vie d'une installation, on se doit aussi de considérer l'efficacité de ces mesures du point de vue de la sûreté et des coûts.

On peut donc donner comme suit, les différentes étapes d'un processus d'anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement :

Etape 1- Identification des mécanismes de dégradation potentiels (pour un matériel passif) et des modes de défaillance potentiels (pour un matériel actif)

Etape 2- Étude de la pertinence de ces mécanismes (ou modes) à un horizon d'exploitation t.

Etape 3- Analyse et hiérarchisation des mécanismes de dégradation (cinétique, modes ou effets du vieillissement, gravité des conséquences, évaluation de la maintenance existante et finalement la criticité)

Etape 4- Identification des parades potentielles pour les défaillances critiques et évaluation de ces parades en termes d'efficacité et de coûts.

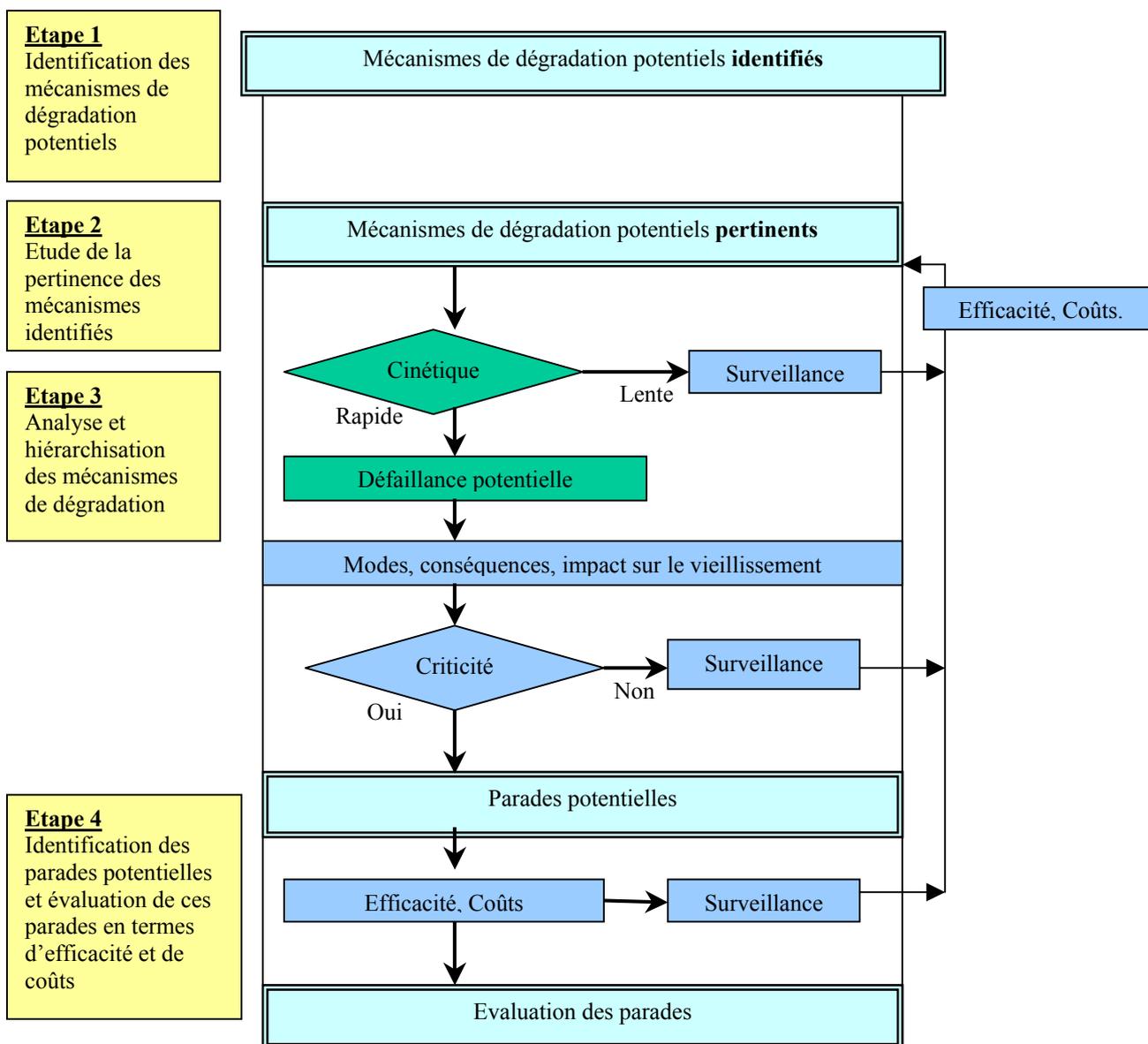


Figure 2.3 : Les étapes d'un processus d'anticipation des défaillances dues au vieillissement d'un matériel.

La figure 2.3 présente l'aspect séquentiel de ces étapes sous la forme d'un logigramme. Notons qu'une surveillance est peut être nécessaire même après la mise en œuvre d'une parade retenue. Dans la suite de cette étude, on se focalise sur l'anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement d'un matériel passif.

## 2.4 Vers une démarche globale d'anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement

Afin d'obtenir les résultats du processus d'anticipation précédemment identifié, l'analyste a besoin de l'avis d'experts. Mais avant de s'adresser aux experts, il doit clairement définir le contexte et les objectifs de l'anticipation et collecter l'ensemble des informations existantes et utiles. Ce processus d'anticipation s'intègre donc dans une démarche globale, intitulée AVISE, Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts (voir figure 2.4).

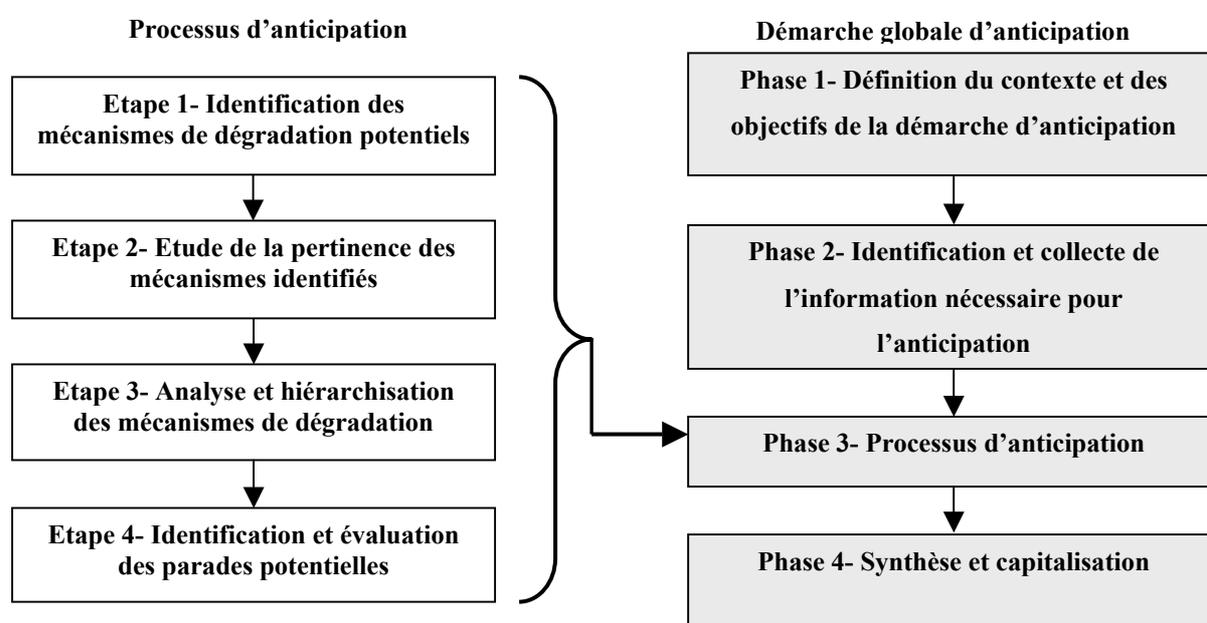


Figure 2.4 : Du processus d'anticipation vers une démarche globale.

### 2.4.1 Identification des différentes phases de la démarche AVISE

Les quatre phases de la démarche AVISE sont présentées ci-dessous :

#### Phase 1- Définition du contexte et des objectifs de la démarche d'anticipation

Lors de cette phase, il s'agit de définir le contexte et les objectifs de la démarche d'anticipation. En effet, pour s'adresser à des experts, il faut présenter clairement le contexte de l'étude et les résultats attendus.

#### Phase 2- Identification et collecte de l'information nécessaire pour l'anticipation

Cette phase va permettre à l'analyste, qui n'est généralement pas lui-même expert du matériel, de cerner les différentes informations qui vont lui permettre de dialoguer avec les experts et de poser les bonnes questions. Ces informations constituent pour le processus d'anticipation une donnée d'entrée qui va aider à stimuler les experts.

### **Phase 3- Processus d'anticipation**

Les différentes étapes de cette phase sont celles du processus d'anticipation (voir figure 2.4). Les étapes du processus d'anticipation s'appuient sur les avis d'experts. Le chapitre 3 sera consacré à l'interrogation d'experts et à son adaptation à l'anticipation. Un certain nombre d'outils et de méthodes sont en outre nécessaires pour aider les experts dans chacune de ces étapes.

### **Phase 4- Synthèse et capitalisation**

A la fin de l'étude, il faut synthétiser et transmettre les résultats aux experts participants pour validation et ensuite au décideur. D'autre part, il s'agit dans cette phase de capitaliser à la fois les résultats de la démarche, mais aussi le déroulement des différentes phases qui ont mené à ces résultats.

## **2.4.2 Construction des différentes phases de la démarche AVISE : choix d'outils ou de méthodes à adapter ou à développer**

### **Phase 1- Définition du contexte et des objectifs de la démarche d'anticipation**

Afin de communiquer le contexte et les objectifs de la démarche, il faut préparer un document destiné aux experts participants. Il doit être clair et concis, décrire le contexte de la gestion de cycle de vie et présenter les objectifs de la démarche à mener. Ce document doit présenter :

- le contexte de la démarche : par exemple gérer la fin de vie ou prolonger de la durée d'exploitation ;
- les définitions importantes : vieillissement, anticipation, mécanisme de dégradation, ... ;
- les objectifs de la démarche ;
- la présentation de la démarche : les différentes étapes du processus d'anticipation, les participants et ce qu'on attend des experts.

Un exemple de document intitulé « Document 1 : Présentation de la démarche d'anticipation, son contexte et ses objectifs » est donné en annexe 3. Il correspond au document produit dans l'application de la démarche d'anticipation à un matériel passif d'une centrale nucléaire, le pressuriseur (voir chapitre 7).

### **Phase 2- Identification et collecte de l'information nécessaire pour l'anticipation**

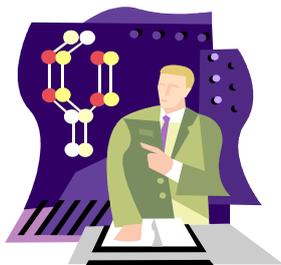
Il s'agit dans cette phase d'identifier toutes les informations nécessaires aux experts pour faciliter l'anticipation.

- Il faut d'abord identifier les sources de l'information, leur disponibilité et leur accessibilité.
- Après la collecte de l'information, il s'agit de juger de leur pertinence et de faire le tri des informations utiles.
- Une fois l'information collectée et analysée, il faut enfin constituer un document qui résume l'ensemble des informations jugées utiles et pertinentes.

Les informations pour l'anticipation sont des informations soit situées sur des supports physiques, de nature très différente : support papier, bases de données, guides, procédures, ..., soit détenues par un ou plusieurs experts. Elles proviennent donc de différentes sources. La figure 2.5 suivante les classe en deux types. Les connaissances transcrites sont celles qui existent sur des supports physiques et qui concernent le matériel étudié. Les connaissances tacites sont celles détenues par l'expert et qu'il faut éliciter.

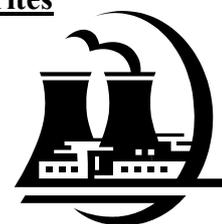
Les informations pour l'anticipation peuvent présenter différents aspects. En effet, il y a des données brutes, comme par exemple, celles du retour d'expérience. On peut aussi trouver des informations par exemple sous forme de procédures de maintenance ou encore des rapports de fiabilité.

### Connaissances tacites



### Connaissances transcrites

- Données de conception, analyse fonctionnelle, schémas techniques
- Données d'exploitation,
- Données de maintenance
- Données du retour d'expérience d'exploitation de l'entreprise.
- Données du retour d'expérience étranger.
- Données du retour d'expérience analogue



**Figure 2.5 : Les sources d'information pour l'anticipation.**

#### *Typologie des informations pour l'anticipation : données relatives aux matériels*

Les données de retour d'expérience ne constituent qu'une petite partie des données relatives au matériel. Ces données peuvent être regroupées en deux ensembles (voir figure 2.6) :

**1- Les données intrinsèques** sont celles relatives à la constitution du matériel. Dans ces données on retrouve :

##### **- Les données de conception**

Ces données concernent tous les éléments relatifs à la conception du matériel. Elles regroupent les composants du matériel, les schémas techniques, les dimensions géométriques des différents composants, les procédures de fabrication et les différents coûts.

##### **- Les données relatives aux matériaux**

Ces données concernent les différents matériaux qui constituent le matériel. Elles regroupent les caractéristiques chimiques et mécaniques de ces matériaux, leurs propriétés et une description des soudures du matériel (s'il y a lieu).

##### **- Les données fonctionnelles**

Ce sont les fonctions globales du matériel et sa décomposition en groupes de composants accomplissant une même fonction.

**2- Les données extrinsèques** sont celles relatives à l'environnement du matériel. Dans ces données on retrouve :

##### **- Les paramètres de fonctionnement**

Les paramètres de fonctionnement regroupent les températures, les pressions, les débits.

##### **- Les données d'environnement interne ou externe**

Les données d'environnement concernent les milieux chimiques interne (fluide véhiculé, ...) ou externe (air atmosphérique, ...) dans lesquels évolue le matériel, et ses interactions avec les matériels environnants.

##### **- Les données de fiabilité**

Elles regroupent les facteurs d'usage et les rapports de sûreté, de fiabilité et de vieillissement.

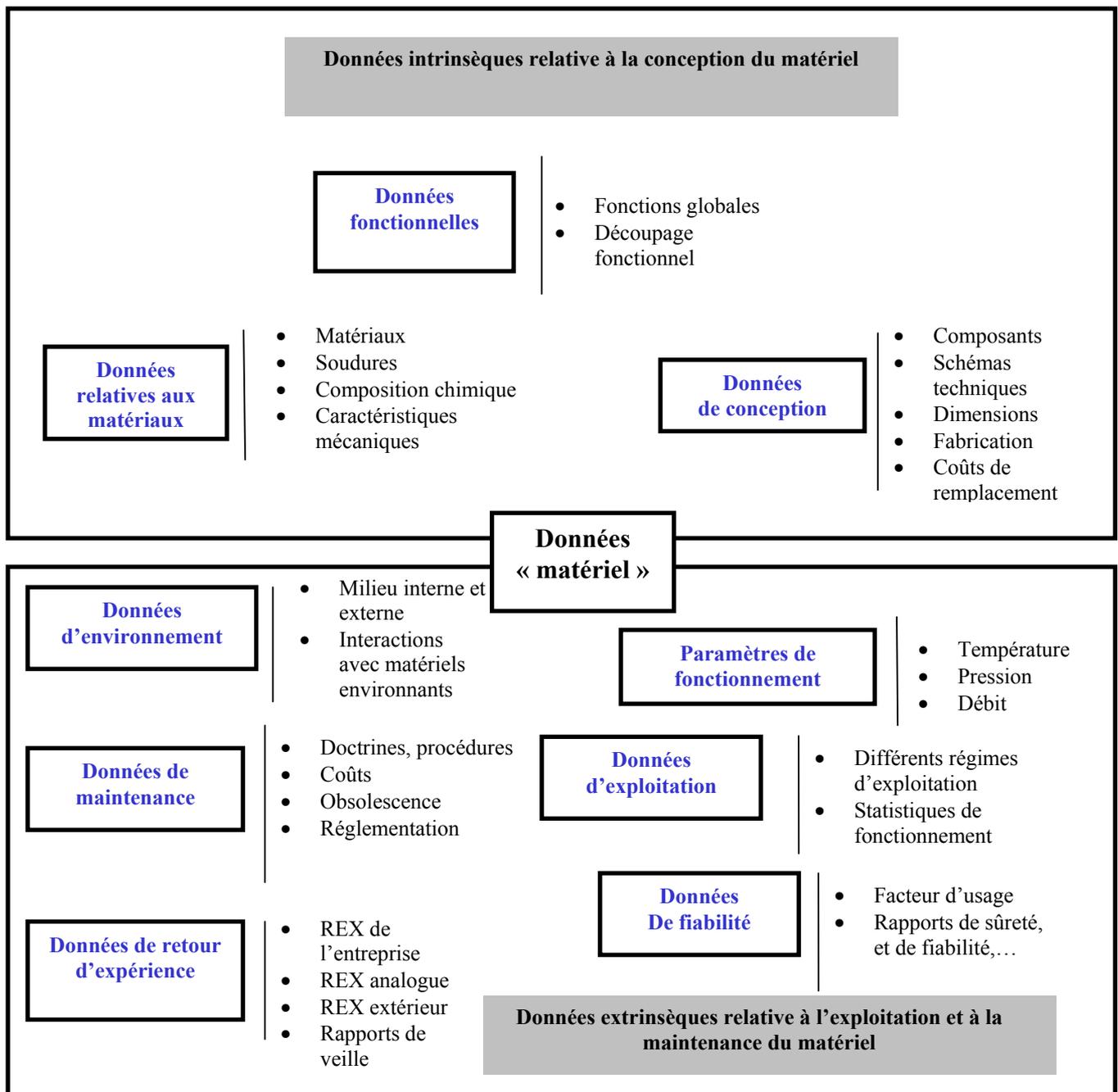


Figure 2.6 : L'ensemble des données relatives au matériel.

**- Les données d'exploitation**

Ces données décrivent les différents régimes d'exploitation du matériel, le nombre d'heures de fonctionnement, le nombre de sollicitations, les temps en régime permanent, les démarrages/arrêts, les transitoires d'exploitation, leur nombre et leur amplitude.

**- Les données de maintenance**

Les données de maintenance sont les programmes de maintenance préventive. Mais ce sont aussi les différents coûts de maintenance, les données concernant l'obsolescence (ou vieillissement technologique) et la réglementation.

### **- Les données de retour d'expérience**

Ces données regroupent le retour d'expérience de l'entreprise, le retour d'expérience analogue (voir paragraphe 4.2.3) et celui des partenaires ou des concurrents ; ainsi que les rapports de veille technologique.

Afin, de vérifier la pertinence de ces informations, l'analyste doit s'adresser de nouveau aux experts du matériel qu'il avait précédemment contactés, pour leur présenter et valider avec eux le résultat de cette recherche d'information. L'analyste doit ensuite constituer un document qui résume l'ensemble des informations jugées utiles et pertinentes et le diffuser aux experts participant à la démarche. Ce document présente :

- une cartographie des informations nécessaires pour l'anticipation,
- les références et les sources d'information,
- les informations concernant le matériel étudié selon la cartographie présentée.

Pour une meilleure lisibilité et selon la quantité d'informations à communiquer, on les présente de trois manières :

- directement dans le document 2,
- en annexe,
- ou en référence aux documents sources.

Un exemple de document intitulé « Document 2 : Informations pour l'anticipation » est donné en annexe 4. Il correspond au document produit dans l'application de la démarche d'anticipation à un matériel passif d'une centrale nucléaire, le pressuriseur (voir chapitre 7).

## **Phase 3- Processus d'anticipation**

Pour chacune des quatre étapes de cette phase, nous allons décrire les spécifications des moyens à mettre en œuvre pour les réaliser. Les aspects relatifs à l'interrogation d'experts seront développés dans le chapitre 3.

### **Etape 1- Identification des mécanismes de dégradation**

Cette étape de l'anticipation est très importante car il faut identifier les mécanismes de dégradation qui pourraient être à l'origine de défaillances potentielles jusqu'à la fin d'exploitation du matériel et particulièrement pendant l'éventuelle période de prolongation (qui n'était donc pas prévue à la conception).

Pour réaliser cette étape, la participation d'un certain nombre d'experts est nécessaire. Il faut réunir d'une part les experts des matériaux qui composent le matériel et d'autre part les experts « cycle de vie » du matériel. Ce sont les connaissances communes de ces experts qui permettront d'identifier d'éventuels nouveaux mécanismes. En effet, un mécanisme de dégradation affecte un matériau donné, connu de l'expert « matériau », dans des conditions d'exploitation données, connues des experts « cycle de vie » du matériel. Sachant que l'échange entre ces experts peut favoriser l'émergence de nouvelles idées, une réunion collective est bien adaptée à cette étape.

Afin de mener à bien cette réunion collective, l'analyste doit suivre une méthode bien structurée pour stimuler la créativité des experts et utiliser au mieux l'ensemble des informations collectées et leurs propres connaissances.

La première méthode de stimulation d'experts proposée, intitulée STIMEX-IMDP, STIMulation d'EXperts pour l'Identification de Mécanismes de Dégradation Potentiels, sera présentée dans le chapitre 4.

Cependant, un premier contact avec chaque expert précédant cette réunion collective est préférable. En effet, il s'agit dans ce premier contact, de présenter le contexte de la démarche d'anticipation et de préciser les résultats auxquels on veut aboutir. Dans ce cadre, l'analyste communique les documents issues des phase 1 et 2 de la démarche. Lors de ce premier contact, l'analyste doit motiver les experts à participer à l'étude, en leur montrant les avantages qu'elle peut leur apporter notamment actualiser et enrichir leurs connaissances.

### **Etape 2- Evaluation de la pertinence des mécanismes identifiés à un horizon d'exploitation donné**

Les mécanismes de dégradation identifiés lors de la première étape du processus d'anticipation sont potentiels pour le matériel étudié. Cependant, un certain nombre de ces mécanismes ne vont pas se manifester durant la période d'exploitation du matériel : on dit qu'il ne sont pas pertinents. Nous cherchons alors, dans cette deuxième étape, à déterminer les mécanismes de dégradation potentiels qui sont pertinents, c'est-à-dire susceptibles de se manifester pendant la période d'exploitation du matériel.

L'analyste peut demander une estimation de cette pertinence aux experts à l'aide d'un questionnaire. Ce questionnaire sera présenté dans le chapitre 7 dans le cadre de l'application de la démarche.

Cependant, cette estimation des experts sera alors basée uniquement sur leur jugement et le questionnaire ne permet pas de donner une justification à cette pertinence. En effet, afin de justifier la pertinence, il faut considérer l'ensemble des paramètres qui peuvent provoquer l'apparition de ces mécanismes potentiels. L'outil qu'il convient alors d'utiliser pour faciliter la tâche de l'expert doit représenter un lien de causalité entre plusieurs paramètres qui peuvent favoriser l'apparition du mécanisme de dégradation en question.

Un diagramme causal répond parfaitement à ce besoin, mais l'expert ne peut pas avoir de certitude pour se prononcer sur la pertinence du mécanisme de dégradation, il ne peut qu'émettre des approximations, vu qu'il se projette dans le futur. Pour quantifier ces approximations il faut un outil qui associe des valeurs de probabilités à un diagramme causal. Plusieurs modélisations graphiques quantifiées existent (les réseau de neurones par exemple), mais souvent elles nécessitent un apprentissage à partir d'un grand nombre de données. Dans notre cas, ces données, correspondant au retour d'expérience sont souvent faibles, voire inexistantes lorsqu'il s'agit de mécanismes de dégradation qui ne sont encore jamais apparus. Pour cette étude prospective, la principale source de données est l'expert. Un modèle graphique probabiliste peut répondre à ce besoin : le réseau bayésien.

Cette représentation graphique des liens de causalité entre les différents paramètres et la pertinence du mécanisme de dégradation permet à l'expert de visualiser des liens jusqu'alors non formulés explicitement. Cependant, l'expert n'est pas toujours capable d'associer des probabilités à ces différents liens, mais peut émettre des avis plus ou moins favorables. C'est alors le rôle de l'analyste de poser les questions qui conviennent afin de les traduire par la suite en probabilités.

Dans le chapitre 5, après une brève étude bibliographique sur les réseaux bayésiens permettant de mieux cerner cet outil et ses différentes applications, une partie est consacrée à la construction, à titre d'exemple, d'un réseau bayésien « générique » (c'est-à-dire applicable à n'importe quel matériel) pour l'évaluation de la pertinence de la fatigue thermique à un horizon d'exploitation  $t$ . Une procédure est ainsi donnée et reste à la disposition de l'analyste qui aurait besoin d'élaborer un nouveau réseau pour un autre mécanisme à étudier. Elle correspond à la construction par expertise du graphe causal et à la rédaction des questions qui permettent d'affecter les différentes probabilités a priori et conditionnelles de ce réseau.

Une analyse de sensibilité permet finalement d'identifier les paramètres les plus influents. Le réseau bayésien renseigne sur la pertinence du mécanisme de dégradation potentiel étudié à l'horizon de la durée d'exploitation cible et nous permet d'identifier les paramètres sur lesquels on peut agir pour ralentir ou éviter son apparition. Mais cette évaluation n'est pas suffisante. Si un mécanisme est pertinent mais que ses conséquences ne sont pas graves, alors il n'est pas nécessaire de fournir un effort supplémentaire de maintenance. Une étape d'analyse et de hiérarchisation des mécanismes de dégradation identifiés (modes, conséquences, criticité) s'avère donc nécessaire.

### **Etape 3- Analyse et hiérarchisation des mécanismes de dégradation**

Pour les mécanismes de dégradation jugés pertinents, il faut par la suite caractériser les défaillances potentielles qu'ils peuvent provoquer et juger de leur criticité.

Dans cette troisième étape, on a besoin d'interroger l'expert en matériaux pour évaluer la cinétique des mécanismes de dégradation pertinents et pour décrire les défaillances qu'ils peuvent provoquer : les modes ou les effets du vieillissement. Les experts « cycle de vie » peuvent renseigner la gravité des défaillances potentielles en termes de sécurité, de disponibilité, de coûts, de qualité et d'image, et éventuellement de dosimétrie (pour le secteur nucléaire). Il est alors possible de hiérarchiser les défaillances identifiées selon leur criticité. Ces informations peuvent être recueillies auprès des experts à l'aide de questionnaires. Un exemple de questionnaire sera présenté dans le chapitre 7 dans le cadre de l'application de la démarche au pressuriseur.

Dans cette étape 3, il faut aussi déterminer si la maintenance actuelle est suffisante ou s'il faut chercher de nouvelles parades. Pour juger de l'impact des mécanismes de dégradation sur le vieillissement, plusieurs paramètres sont à considérer. Ces paramètres ont été identifiées et structurés par un réseau bayésien qui sera présenté dans le chapitre 5. Ce réseau permet d'évaluer l'impact sur le vieillissement d'un mécanisme de dégradation. Si cet impact est important et que les procédures actuelles de maintenance sont insuffisantes, il faut alors mettre en place de nouvelles parades, on passe à l'étape suivante.

### **Etape 4- Identification et évaluation des parades potentielles**

Pour les défaillances potentielles jugées pertinentes et critiques et pour lesquelles la maintenance actuelle s'avère insuffisante, il faut mettre en place de nouvelles solutions. Pour cela, nous préconisons une réunion collective qui permettrait l'émergence de nouvelles idées. Les experts à réunir sont les experts « cycle de vie » du matériel et

particulièrement les experts en maintenance. Ce sont, en effet, ces derniers qui maîtrisent le mieux la faisabilité des solutions proposées et leurs conséquences sur le fonctionnement du matériel.

Plusieurs types de parades ont été recensés [CEC, 2000] et classés ci-dessous suivant l'importance de l'investissement à mettre en œuvre pour leur réalisation :

- le changement des paramètres d'exploitation,
- le changement ou la restauration des caractéristiques des matériaux,
- le remplacement à l'identique,
- la reconception.

Pour trouver ces nouvelles parades, on peut s'appuyer aussi sur le retour d'expérience pour reproduire ou adapter les solutions mises en place dans des situations similaires.

Une fois les parades potentielles identifiées, il faut les évaluer du point de vue de leur efficacité et de leurs coûts. L'estimation de l'efficacité et des différents coûts peut être faite par les experts en maintenance du matériel. Pour cela, il faut construire un questionnaire selon les parades proposées à renseigner par les experts.

Pour la mise en œuvre de cette étape, une méthode de stimulation d'experts qui s'appuie sur cette typologie des parades est proposée dans le chapitre 4. Elle est intitulée STIMEX-IPP, STIMulation d'EXperts pour l'Identification de Parades Potentielles.

La figure 2.7, illustre dans la colonne du milieu les quatre étapes du processus d'anticipation et leurs résultats attendus. La colonne de gauche donne les supports méthodologiques choisis pour chaque étape. Dans la colonne de droite, sont présentées les principales informations nécessaires pour la réalisation des étapes 1 et 4. Pour l'étape 1, les informations nécessaires sont les informations existantes sur le matériel, comme les schémas techniques et les matériaux, les informations concernant les mécanismes de dégradation du matériel, ceux prévus par l'AF et l'AMDE par exemple et ceux avérés par le retour d'expérience du matériel. Deux autres types d'information sont aussi nécessaires pour cette étape 1, ils seront décrits dans le chapitre 4 : le retour d'expérience analogue et extérieur (voir paragraphe 4.2.3) et la liste de référence des mécanismes de dégradation (voir paragraphe 4.2.2). Pour l'étape 4, les informations nécessaires sont le retour d'expérience du matériel, analogue et extérieur, les procédures de maintenance actuelles du matériel et enfin une liste de parades génériques. Cette liste sera présentée dans le chapitre 4 (voir paragraphe 4.3.1).



## Phase 4- Synthèse et capitalisation

Il s'agit de capitaliser et de transmettre les résultats de la démarche d'anticipation aux différents protagonistes.

### 4.1- Capitalisation

Il faut capitaliser à la fois les résultats de la démarche mais aussi les différentes phases qui ont mené à ces résultats. Pour cela, il est nécessaire de créer un support qui soit facile à utiliser et qui permette de retrouver facilement les informations souhaitées pour favoriser leur actualisation et leur réutilisation (voir figure 2.8).

Etant donné un matériel étudié, on doit capitaliser pour chaque couple : composant/mécanisme de dégradation, le matériau qui peut être affecté par le mécanisme, les conditions d'exploitation qui ont favorisé l'apparition du mécanisme, les effets du vieillissement qu'il provoque, les modes de défaillance, le retour d'expérience existant, les procédures de surveillance et les procédures de maintenance préventive.

Un outil informatisé de saisie et de recherche, associé à une base de données constitue le meilleur moyen pour faciliter la capitalisation et la réutilisation de ces résultats. Les spécifications d'un tel support et ses utilisations possibles dans le cadre de l'anticipation seront présentées dans le chapitre 6.

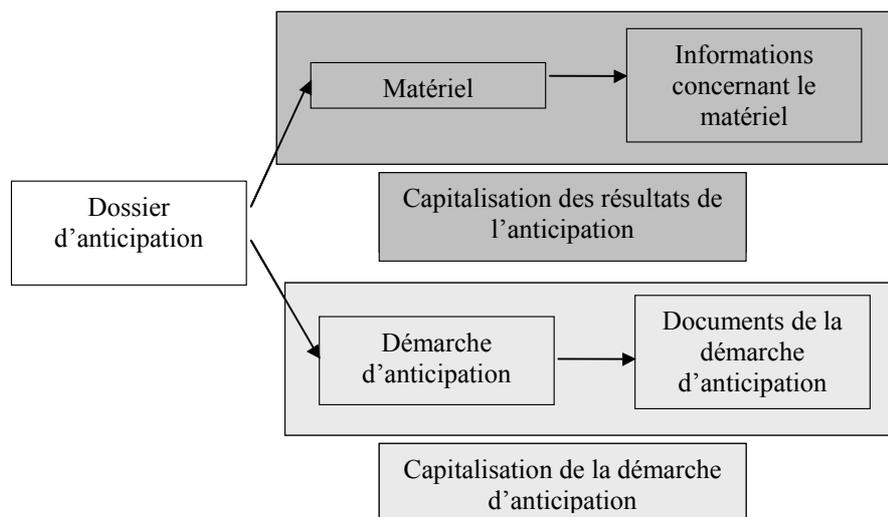


Figure 2.8 : Capitalisation dans la démarche d'anticipation.

### 4.2- Synthèse et communication des résultats

A la fin de l'étude, il faut communiquer les résultats aux experts ayant participé à la démarche d'anticipation et au décideur. Ceci peut être fait au moyen d'un document qui résume les résultats de la démarche d'anticipation. Ces résultats étant destinés au décideur, nous les appelons : « informations pour l'aide à la décision ».

Les informations pour l'aide à la décision sont celles qu'il faut mettre à la disposition du décideur pour lui permettre de faire les choix adéquats par rapport aux solutions suggérées. C'est une synthèse, faite par l'analyste, des résultats recueillis lors de la démarche d'anticipation. Plusieurs éléments essentiels constituent les informations pour l'aide à la décision :

- les triplets composant ou zone/mécanisme de dégradation/mode ou effet du vieillissement, qui caractérisent les défaillances potentielles dues au vieillissement du matériel,
- la pertinence des mécanismes de dégradation par rapport à l'amorçage et à la cinétique à l'horizon de la durée d'exploitation visée,
- la gravité des conséquences des défaillances en termes de sûreté, d'indisponibilité, de coûts, de dosimétrie et d'image,
- la hiérarchisation des triplets selon leur criticité (qui est fonction de la pertinence et de la gravité),
- les solutions proposées pour éviter ou ralentir les défaillances jugées critiques (évaluation de leur efficacité et de leur coûts),

La démarche d'anticipation est développée dans un contexte de gestion de cycle de vie. Si une prolongation de la durée d'exploitation de l'installation est envisagée, le décideur doit optimiser le choix des solutions pour chaque matériel, en tenant compte des résultats de l'anticipation sur l'ensemble des matériels critiques de l'installation. Pour cela, une étude technico-économique peut être menée sur l'ensemble de l'installation. Cette phase de choix de solution ne rentre pas dans le cadre de cette étude. (voir figure 2.9).

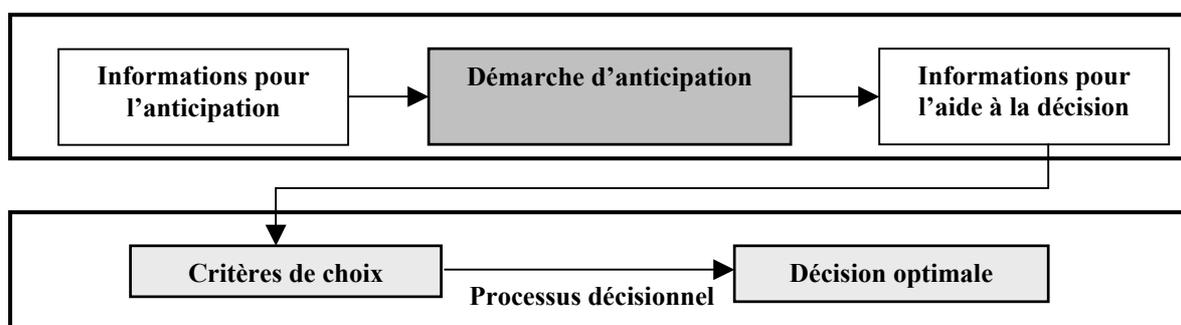


Figure 2.9 : Anticipation des défaillances et aide à la décision.

Un exemple de document de synthèse intitulé « Document 3 : Synthèse des résultats de la démarche d'anticipation », a été réalisé dans le cadre de l'application de la démarche au pressuriseur (voir annexe 5).

## Conclusion

La notion de matériel a été définie dans ce chapitre. Une comparaison de ces deux types de matériels, les matériels actifs et les matériels passifs, a permis de mettre en évidence deux constatations :

- l'anticipation paraît plus adaptée aux matériels passifs.
- les matériels actifs, importants pour la sûreté ou critiques du point de vue des coûts de disponibilité et de maintenance peuvent aussi mériter une anticipation à long terme.

Dans la suite de ce travail, nous nous intéressons essentiellement à l'anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement, pour un matériel passif.

A partir de la définition de l'anticipation, un processus a été identifié. Il se compose d'une séquence de 4 étapes. Ce processus d'intègre dans une démarche globale d'anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement. Quatre phases ont alors été identifiées pour cette démarche.

Finalement, une description des différentes phases de la démarche d'anticipation permet de présenter, tout en justifiant ces choix, les différents outils ou méthodes proposés pour répondre aux besoins méthodologiques. Ces outils sont construits ou adaptés à la démarche dans les chapitres suivants :

- Le chapitre 3 présente l'interrogation d'experts qui intervient dans la phase 3 de la démarche globale d'anticipation.
- Le chapitre 4 présente la construction de deux méthodes de stimulation d'experts qui interviennent dans les étapes 1 et 4 du processus d'anticipation.
- Le chapitre 5 présente l'utilisation des réseaux bayésiens qui interviennent dans les étapes 2 et 3 du processus d'anticipation.
- Le chapitre 6 présente les spécifications d'une base de données de capitalisation qui intervient dans la phase 4 de la démarche globale d'anticipation.
- Tous les autres documents types ou questionnaires sont présentés dans le chapitre 7 dans le cadre de l'application de la démarche au pressuriseur ou en annexe.

## Chapitre 3

---

### Le jugement d'expert pour l'anticipation

---

Ce chapitre présente un aspect important dans l'anticipation : le jugement d'expert.

Dans une première partie, nous présentons le jugement d'expert de manière générale. Un historique permet de répondre à un certain nombre de questions : qu'est ce que l'interrogation d'experts ? Dans quels cas cette pratique est-elle utilisée ? Dans quels domaines est-elle apparue ? Suite à une définition de l'expertise, les axes de recherche, qui permettent de voir l'évolution de cette pratique de recours à l'expertise, sont présentés.

Une seconde partie présente un ensemble de méthodes d'interrogation d'experts identifiées dans la littérature. Elles sont décrites dans ce chapitre de manière succincte. Un ensemble de fiches plus élaborées a été créé. Elles sont données en annexe 1. Ces fiches permettent de présenter rapidement les caractéristiques de chaque méthode d'interrogation, les différentes étapes, les applications effectivement réalisées, ... On peut remarquer que ces méthodes ont été utilisées principalement dans le domaine nucléaire.

Une première analyse de ces méthodes permet d'identifier un processus générique d'une méthode d'interrogation d'experts qui se décline en six points plus ou moins développés d'une méthode à une autre.

Nous nous intéressons dans une troisième partie plus particulièrement au jugement d'expert pour l'anticipation. Un premier paragraphe permet de mettre en évidence le besoin de l'expertise pour l'anticipation. Ce besoin se traduit par un ensemble de fonctions et de contraintes auxquelles doit satisfaire une méthode d'interrogation d'experts pour l'anticipation.

Ensuite, les méthodes d'interrogation recensées sont analysées et classées par rapport à leur adaptation à l'anticipation et à l'effort de mise en oeuvre qu'elles nécessitent. Cet exercice, réalisé avec l'aide de plusieurs experts, a pour objectif d'identifier les méthodes les plus intéressantes pour l'anticipation et qui ne nécessitent pas des efforts très importants de mise en oeuvre. Il se base sur l'ensemble des fiches précédentes. Un tableau de synthèse résume l'intérêt de chaque méthode pour l'anticipation ainsi que les principaux points faibles détectés. Cette analyse permet finalement d'identifier un certain nombre de critères intéressants pour l'anticipation.

## 3.1 Le jugement d'expert

Avant d'élaborer une méthode de recueil de jugement d'expert, un regard historique sur le jugement d'expert s'impose. Il s'agit d'identifier les conditions dans lesquelles on a recours au jugement d'expert et les premières applications qui l'ont utilisé comme source de donnée pertinente pour l'aide à la prise de décision. Les différents axes de recherche dans ce domaine seront ensuite présentés.

### 3.1.1 Historique

La notion d'expert n'est pas nouvelle mais l'utilisation du jugement d'expert comme entrée pertinente d'un processus de décision est relativement récente. Selon Cooke [Cooke, 1991], ce phénomène est apparu avec l'établissement de la « Rand Corporation » (R-and-D) aux Etats Unis après la deuxième guerre mondiale. Les deux premières méthodes utilisant le jugement d'expert ont été développées par cette institution financée en partie par l'armée de l'air américaine. Ces deux méthodes sont *l'analyse de scénarios* et *la méthode Delphi*.

#### *L'analyse de scénarios*

Herman Kahn est considéré comme le père de l'analyse de scénarios [Cooke, 1991]. Dans son livre *The Year 2000* [Kahn et Wiener, 1967], Kahn définit le scénario comme suit : *les scénarios sont des conséquences potentielles d'événements construits dans le but de mettre en évidence les processus de causalité et les décisions. Ils répondent à deux types de questions :*

- *Comment, étape par étape, une situation potentielle peut-elle se réaliser ?*
- *Quelles sont les options, pour chaque acteur, à chaque étape, qui permettent de prévenir, de changer ou de faciliter le processus ?*

#### *La méthode Delphi*

La méthode Delphi a été développée par la « Rand Corporation » au début des années 1950 lors du « Projet Delphi » financé par l'armée de l'air américaine. Le but du projet était d'anticiper un objectif optimal pour l'industrie américaine dans le cas d'un hypothétique plan stratégique soviétique. En 1974, le nombre des études Delphi a dépassé les 10 000.

La méthode se base sur des élicitations individuelles des experts qui peuvent ainsi s'exprimer librement et sans influence. Un retour anonyme de toutes les réponses ainsi que la médiane des réponses sont ensuite envoyés aux experts qui peuvent reconsidérer leurs propres réponses en fonction de celles des autres. Les experts qui restent sur des positions extrêmes doivent justifier leur choix. Ce processus est réitéré jusqu'à l'aboutissement à un consensus ou à la justification des divergences. Le processus est réitéré en général trois à quatre fois. Lors de la dernière élicitation, la dispersion des réponses est moins importante que lors de la première, les experts ayant abouti à un consensus. La médiane de la dernière élicitation est considérée comme la meilleure prévision.

### 3.1.2 Définition de l'expert et de l'expertise

**Définition 13 :** *Ballay [Ballay,1997] donne une définition de l'expert comme étant « celui qui détient le savoir ».*

#### L'expertise est :

- une réponse à un problème technique,
- un appoint à un retour d'expérience éventuellement déficient ; elle permet de compléter ou de suppléer des données peu nombreuses, dispersées, inexistantes, ou douteuses et inapplicables,
- un support d'aide à la décision,
- un ensemble de prévisions,
- un état de l'art sur un sujet qui contribue à l'enrichissement des connaissances.

#### L'expertise est une donnée incertaine

- L'expert est une source de données souvent qualitatives, parfois quantitatives. Ainsi, comme toute donnée, c'est une représentation imparfaite et incertaine [Lannoy et Procaccia, 2001].
- L'expertise dépend de l'expert (ses connaissances, son expérience, sa motivation, son sérieux), de l'état des connaissances concernant le cas étudié, du dialogue entre l'expert et l'analyste et de l'interprétation que va donner ce dernier de l'expertise.

#### Donc

- L'interrogation d'experts est un exercice coûteux et délicat, qui permet un enrichissement des connaissances sur un sujet [Lannoy et Procaccia, 2001].
- Une méthode d'interrogation d'experts doit tenir compte de l'incertitude de l'expertise et la représenter de manière adéquate [Cooke,1991].

### 3.1.3 Les axes de recherche

L'interrogation d'experts intéresse la communauté de recherche, ce dont témoigne la quantité des axes de recherche qui concernent, à l'heure actuelle, les méthodes d'interrogation d'experts :

- 1- le choix des experts et les critères de sélection des experts, en fonction de leurs connaissances, de leurs expériences, de leur notoriété, de leur motivation, de leur disponibilité,...
- 2- l'étalonnage des experts : comment quantifier la qualité et le niveau d'information apportée par chaque expert,

- 3- l'élicitation de l'expertise : comment préparer les experts et recueillir leur jugement ? soit par des techniques directes (demander des valeurs quantitatives), soit par des techniques indirectes (poser les questions sous forme de propositions et traduire les réponses en probabilités),
- 4- l'analyse des réponses, la prise en compte des biais, de l'étalonnage, la pondération, l'agrégation et la dépendance entre les experts,
- 5- la modélisation mathématique de l'expertise,
- 6- la prise en compte de l'incertitude, les difficultés et les limites d'une démarche d'interrogation d'experts.

## 3.2 Analyse de différentes méthodes d'interrogation d'experts

Plusieurs méthodes d'interrogation d'experts ont été recensées dans le cadre de ce travail. Sept d'entre elles ont été utilisées essentiellement dans des applications de sûreté nucléaire (voir paragraphe 2.2.1) :

- NUREG-1150,
- STUK-VTT,
- NNC,
- FEJ-GRS,
- KEEJAM,
- CTN-UPM,
- TUD.

**Nous avons recensé d'autre part, d'autres méthodes d'interrogation d'experts utilisées dans le cadre de démarches (voir paragraphe 2.2.1) :**

- La démarche TRIZ-AFD (pour l'anticipation de défaillances, la recherche de solutions et aussi pour l'aide à la conception),
- La démarche RIPBR, Risk-Informed, Performance-Based Regulation (en sûreté nucléaire et aide à la maintenance, voir paragraphe 1.2.7).
- La démarche LCM (dans le cadre de gestion de cycle de vie, voir paragraphe 1.2.6),
- La démarche PMDA-PIRT, Proactive Materials Degradation Assessment- Phenomena Identification and Ranking Table (pour l'anticipation des dégradations des matériaux dues au vieillissement, voir paragraphe 1.2.8)

Toutes ces méthodes ont été utilisées dans des applications nucléaires, mais certaines d'entre elles ont été appliquées dans d'autres domaines comme le transport, la médecine, ... (voir les rubriques « applications » de l'annexe 1).

### 3.2.1 Description des méthodes : les fiches

Une fiche méthodologique a été réalisée pour décrire de manière synthétique chacune de ces méthodes (voir annexe 1).

Chaque fiche contient :

- **la date et le pays** de développement,
- **l'organisme** qui a réalisé la méthode,
- les **caractéristiques** de la méthode, et son originalité,
- les données **d'entrée et de sortie** de la méthode.

La fiche présente par la suite :

- les différentes **étapes** de la méthode,
- **les outils existants** pour sa mise en œuvre,
- **les principales applications**,
- les **points faibles et les points forts**,
- **les références** de base.

Nous décrivons brièvement ci-dessous chacune des méthodes recensées.

▪ **Méthode NUREG-1150 [Keeney, 1991], [Cojazzi et Fogli, 2000]**

Cette méthode a été développée en 1987-1990 par l'autorité de sûreté nucléaire américaine, la NRC (Nuclear Regulatory Commission). L'objet de cette méthode consiste à évaluer un état de connaissance d'événements, de variables ou de processus, lorsqu'on dispose de données incomplètes ou de modèles inadéquats. C'est une méthode très structurée. Elle inclut un entraînement des experts, une revue des discussions et des élicitations individuelles, l'agrégation des opinions et une revue finale par les experts.

Dans la méthode NUREG-1150, chaque expert rédige un rapport sur l'étude. Après discussions entre les experts dans le cadre d'une élicitation collective, les estimations finales sont élicitées individuellement. Cette méthode est, dans la pratique, très utilisée (voir annexe 1, la fiche NUREG-1150, paragraphe Applications) et a inspiré le développement de plusieurs autres méthodes (notamment « STUK-VTT », « CTN-UPM » et « TUD »).

▪ **Méthode STUK-VTT [Pulkkinen et Holmberg, 1997], [Simola et Virolainen, 2000], [Cojazzi et Fogli, 2000]**

Cette méthode a été développée en 1997 par la société finlandaise VTT Automation et l'autorité de sûreté nucléaire finlandaise STUK. La méthode était destinée à l'origine à être utilisée dans différents cas d'estimation quantitative de risque ou de fiabilité, en ingénierie et en analyse économique, où de grandes incertitudes sont toujours présentes.

La méthode est basée sur la représentation probabiliste des incertitudes. Les prévisions des experts sont exprimées sous la forme de distributions de probabilité. La combinaison de ces estimations est fondée sur les réseaux bayésiens (voir chapitre 5). Grâce à l'utilisation de cet outil, il est relativement aisé d'interroger les experts, même s'ils ne sont pas familiarisés avec les concepts probabilistes. Cette méthode est appliquée pour le traitement de phénomènes qui présentent une grande incertitude ou quand les données expérimentales sont insuffisantes ou manquantes. Cependant, même s'il n'y a pas de restriction sur l'applicabilité de la méthode, il vaut mieux l'appliquer pour des prévisions sur des paramètres quantitatifs.

- **Méthode NNC [Cojazzi et Fogli, 2000]**

Cette méthode a été développée en 1996. C'est une méthode fondée sur les principes et les procédures de qualité du NNC Quality Procedures and Engineering Manual (NNC Limited est une société nucléaire indépendante du Royaume Uni).

S'appuyant sur les méthodes d'assurance qualité des sources d'information et des processus de résolution de problèmes, la méthode NNC est basée sur des estimations individuelles des experts.

- **Méthode FEJ-GRS [Cojazzi et Fogli, 2000]**

Cette méthode a été développée en 1985 par l'autorité de sûreté nucléaire GRS en Allemagne. La méthode se base sur la décomposition d'une question de départ en sous-éléments. La quantification de l'état de connaissance de ces différents sous-éléments permet de donner une incertitude quantitative de la réponse à la question globale. La méthode agrège les jugements sur les niveaux les plus bas de la décomposition et les propage à travers la décomposition pour parvenir à une expression quantifiée de l'état des connaissances, au niveau de la sortie du modèle.

La méthode nécessite le concours de plusieurs types d'experts. Deux types d'équipes sont distingués :

- des équipes composées d'experts d'une même discipline ; dans ce cas, l'agrégation est faite uniquement au sein d'une même équipe,
- des équipes composées d'experts interdisciplinaires ; dans ce cas, l'agrégation est faite entre les résultats agrégés fournis par les différentes équipes.

- **Méthode KEEJAM [Cojazzi et al, 1996], [Cojazzi et al, 1997], [Cojazzi et al, 1998], [Cojazzi et Fogli, 2000]**

Cette méthode a été développée en 1997 au centre européen JRC-ISIS (Joint Research Center) en collaboration avec l'Université de Brescia et l'Université de Bologne en Italie. La méthode à base de connaissances, KEEJAM, Knowledge Engineering methodology for Expert Judgement Acquisition and Modeling, s'appuie sur des techniques d'ingénierie des connaissances. Elle permet une modélisation des connaissances de l'expert. Elle permet également de modéliser le processus par lequel l'expert résout le problème posé.

Cette méthode fournit un support structuré à l'analyste (dans ce cas, l'ingénieur en gestion des connaissances), pour l'élicitation des connaissances et des stratégies de raisonnement de l'expert, pour la construction de modèles de connaissances et pour l'application de ces modèles aux résultats de l'expertise.

- **Méthode CTN-UPM [Cojazzi et Fogli, 2000]**

Cette méthode a été développée en 1997 au département d'énergie nucléaire de l'Université Polytechnique de Madrid, Espagne. Cette méthode a été développée sur les bases de la méthode NUREG-1150.

Le protocole CTN a été développé afin d'estimer des probabilités subjectives de paramètres inconnus et d'événements incertains. Il consiste en neuf étapes réalisées de manière séquentielle.

- ***TUD, Le guide européen pour l'interrogation structurée d'experts* [Cooke et Goossens,1996] , [Cooke et Goossens, 2000]**

Il a été développé en 1996, à l'Université de Technologie de Delft (TUD), Pays-Bas. Il s'agit d'un guide européen pour jugement d'expert en analyse d'incertitude.

C'est un ensemble de procédures à appliquer dans une interrogation d'experts afin de déterminer des distributions de probabilités pour une analyse d'incertitude. Dans ce domaine d'application, les méthodes développées à l'Université de Delft ont bénéficié des expériences en jugement d'expert réalisées aux Etats-Unis avec la méthode NUREG-1150. Le guide de procédures est une synthèse de l'ensemble de ces méthodes.

- ***La démarche LCM* [Sliter et al, 2000], [Sliter et al, 2001], [Sliter et Gregor, 2001], [Sliter, 2003]**

La démarche LCM, Life Cycle Management, a été développée à la fin des années 1990 par l'EPRI (Electric Power Research Institute) aux Etats Unis. C'est une méthode pour la gestion du cycle de vie des matériels des centrales nucléaires. LCM permet la gestion du vieillissement et de l'obsolescence des systèmes, structures et composants les plus importants pour la durabilité.

Cette démarche fournit aussi une solution optimale pour la gestion du cycle de vie du matériel sur la base d'une comparaison technico-économique entre différentes solutions possibles. Elle permet de maximiser la valeur de la tranche nucléaire (en réduisant les coûts) tout en assurant le niveau de sûreté. Le rôle de l'expert est, entre autres, de fournir les options possibles pour la gestion du cycle de vie et leurs caractéristiques. L'interrogation d'experts est très guidée, sous la forme de logigrammes (voir paragraphe 1.2.6).

- ***La démarche TRIZ-AFD* [Kaplan,1999], [Guarnieri et Haïk, 2002]**

Cette démarche a été développée en 1997 par S. Kaplan aux USA. C'est une méthode d'identification et d'analyse des défaillances à partir de la méthode de résolution de problèmes et d'aide à l'innovation TRIZ. Sa version TRIZ-AFD ( Anticipatory Failure Determination) a été récemment développée aux Etats-Unis.

L'AFD se décompose en deux outils : l'AFD 1 et l'AFD 2. L'AFD 1 est destinée à l'analyse des causes d'une défaillance survenue. L'AFD 2 reprend les grandes étapes de l'AFD 1, complétées par un grand nombre d'étapes dédiées à une dynamique de créativité plus étendue.

- ***La démarche RIPBR, Risk-Informed, Performance-Based Regulation* [Golay, 2000]**

Cette méthode a été développée en 1995 par le Department of Nuclear Engineering, du MIT, aux Etats-Unis. Contrairement aux méthodes classiques dites « prescriptives » qui dressent des listes de consignes ou de recommandations pour la sûreté nucléaire à respecter de manière systématique, la méthode RIPBR permet d'établir un compromis entre l'amélioration de la sûreté et la réduction des coûts.

Cette recherche de compromis est faite sur la base de l'expertise. Cette méthode permet une meilleure compréhension des modes de défaillance et des mécanismes de dégradation, une meilleure estimation des taux de défaillance avec leurs incertitudes. C'est, cependant une démarche encore en évolution (voir

paragraphe 1.2.7). Elle recommande l'utilisation du guide de procédures pour jugement structuré d'experts (voir plus haut le paragraphe « TUD »)

▪ ***La démarche PMDA-PIRT, Proactive Materials Degradation Assessment- Phenomena Identification and Ranking Table [NRC, 2004a], [NRC, 2004b]***

Cette méthode a été développée en 2003 par l'autorité de sûreté nucléaire américaine, la NRC (Nuclear Regulatory Commission). C'est une démarche d'anticipation des mécanismes de dégradation impliqués dans le vieillissement des centrales nucléaires (voir paragraphe 1.2.8).

### **3.2.2 Processus générique d'une méthode d'interrogation d'experts**

Cette analyse bibliographique des méthodes existantes a permis de déterminer un processus générique d'une méthode d'interrogation d'experts. En effet, une comparaison des différentes méthodes a révélé un ensemble de points génériques plus ou moins développés, en fonction de l'objectif initial de la méthode.

Le processus générique d'interrogation d'experts est le suivant :

- a- Définition des objectifs de l'élicitation
- b- Choix des experts à éliciter
- c- Préparation du questionnaire
- d- Élicitation
- e- Agrégation et modélisation des réponses des experts
- f- Synthèse et capitalisation

Un point générique peut se décliner, selon les méthodes, en un ou plusieurs points, en fonction de l'intérêt que lui accorde la méthode. A titre d'exemple, le point a- définition des objectifs de l'élicitation, se traduit dans NUREG-1150 par un point d'« identification et de sélection des résultats de l'étude » et se décline dans la méthode KEEJAM en sept points différents.

Les points génériques d'un processus d'interrogation d'experts sont décrits ci-dessous :

#### ***a- Définition des objectifs de l'élicitation***

Ce point peut regrouper plusieurs tâches. Souvent ces tâches dépendent de la méthode et de ses finalités. Pour KEEJAM, par exemple, on regarde si une approche d'ingénierie des connaissances est adaptée au cas étudié. L'analyste a souvent un rôle très important dans ce point. En effet, il doit définir le contexte de l'étude, ses objectifs, les résultats aussi bien qualitatifs que les différents paramètres et modèles qui sont à quantifier. Pour cela il doit souvent passer par une recherche d'information. Pour consolider les résultats de ces recherches et les différents paramètres et modèles qu'il a identifiés, l'analyste peut s'appuyer sur l'expertise d'un ou de plusieurs experts. Ce point débouche généralement sur un plan de travail qui regroupe les différents documents de l'expertise à mener. Ces documents résument le contexte, les objectifs, les informations et les outils qui seront utilisés durant l'expertise. Ces documents accompagnent l'élicitation et peuvent être envoyés préalablement aux experts.

### ***b- Choix des experts à éliciter***

Le titre d'«expert» dépend du savoir et de l'expérience passée dans un domaine donné et de la reconnaissance des autres comme étant l'un des experts les plus compétents du domaine. Mais l'expert vivant dans un contexte donné est influencé par son environnement et peut donc être influencé dans son jugement. C'est ce qu'on appelle les biais de l'expertise.

Souvent ce point de « choix des experts » comprend deux parties.

#### **L'identification des experts**

La première partie consiste à identifier les experts qui peuvent participer à l'expertise Il faut pour cela, établir un certain nombre de critères de choix. Cet aspect est particulièrement important lorsqu'on cherche à constituer une équipe pluridisciplinaire. Dans ce cas, il faut définir les différentes compétences souhaitées et identifier ainsi les experts concernés.

A titre d'exemple, la procédure d'identification des experts, appelée « round robin », proposée par le guide européen [Cooke, 2000] est présentée, ci-après. Notons qu'à l'EPRI, le vocable « round robin » désigne plus un exercice de comparaison entre différentes méthodes.

- 1- L'analyste propose un certain nombre d'experts potentiels ; ces personnes sont contactées ; on leur pose les questions suivantes :
  - quelle sont vos connaissances et compétences nécessaires et utiles à la résolution du cas d'étude ?
  - quels sont les autres experts pouvant être compétents pour ce cas d'étude ?
- 2- Les personnes nommées par les experts sont contactées, on leur pose les mêmes questions.
- 3- L'étape 2 est réitérée jusqu'à ce que (a) plus aucun nouveau nom n'apparaisse ou (b) il est jugé qu'un nombre suffisant d'experts est atteint.

#### **La sélection des experts**

Ensuite, il s'agit de sélectionner l'équipe des experts qui vont participer à l'étude. Ici encore on peut s'appuyer sur un certain nombre de critères : le niveau de compétence, la disponibilité, l'intérêt de l'expert pour l'étude à mener...La méthode NUREG-1150 [Cojazzi,2000], sur la base des recherches de Clemen et Winkler, préconise un nombre minimal de 5 experts pour une étude [Clemen et Winkler, 1985]. La méthode TUD fixe ce nombre minimal à 4 [Cooke,2000]. On peut penser qu'un nombre impair d'experts à interroger, est préférable, si bien entendu c'est possible.

Cependant, comme cité dans [Lannoy et Procaccia, 2001], les auteurs soulignent un certain nombre d'études dans les domaines de la médecine, de la psychologie de la météorologie et de l'économie qui favorisent l'expertise d'un nombre important d'experts plus « ordinaires » plutôt que celle des experts les plus expérimentés. Cela reste encore peu fréquent dans les domaines techniques où la connaissance, l'expérience et la notoriété de l'expert restent les critères les plus importants. Ils ajoutent néanmoins que, dans bon nombre de problèmes techniques, il est difficile de recourir à plus de deux experts, l'un étant un expert d'ingénierie de conception, l'autre d'exploitation et de maintenance.

Notons d'ailleurs, que Lannoy considère que l'expertise « vague » des moins bons experts, peut s'avérer plus justifiable que les opinions pointues des bons experts. Ceci est particulièrement vrai pour les interrogations quantitatives. En acceptant des avis peu précis, les données de retour d'expérience permettent de préciser in fine les résultats de l'expertise. Ceci est bien évidemment valable si l'on dispose d'un retour d'expérience de qualité.

### *c- Préparation du questionnaire*

Ce point est très important dans le processus de jugement d'expert. Il permet de définir les questions à poser à chaque expert ou au groupe d'experts et pour chaque étape de l'élicitation. La méthode NUREG-1150 [Cojazzi,2000] préconise que ce point soit réalisé suite à une élicitation collective avec tous les experts qui définissent, ensemble et avec l'analyste, les informations qualitatives nécessaires, les variables ou paramètres importants et les questions auxquelles il faut répondre.

A l'issue de ce point, plusieurs méthodes recommandent un entraînement des experts aux notions de probabilité, c'est le cas de NUREG-1150, de STUK -VTT, de FEJ-GRS et du guide européen. Si on veut éviter cet entraînement, c'est à l'analyste de faire l'effort de poser les questions de manière parlante pour l'expert (par exemple nombre de défaillances par intervalle de temps, ou un choix entre plusieurs valeurs, ou appréciation subjective (probable, peu probable,...)) et ensuite il peut traduire ces réponses en probabilités. L'analyste utilise dans ce cas des techniques indirectes.

### *d- Élicitation*

**Définition 14 :** *L'élicitation est le processus permettant de recueillir et d'assembler des opinions d'experts à partir de méthodes de communication écrites ou orales [Lannoy et Procaccia, 2001].*

L'élicitation peut être collective ou individuelle, elle est souvent une combinaison des deux. Les élicitations collectives permettent un échange entre les experts qui favorise l'émergence de nouvelles idées et qui met en évidence les divergences entre les experts. Les élicitations individuelles donnent à chaque expert le moyen d'exprimer sa propre opinion sans pression extérieure. On évite, lors de ces séances individuelles, les rapports de force qui peuvent exister dans les réunions collectives, où un « leader » peut monopoliser l'opinion du groupe et où les timides ont du mal à donner leur avis. Ainsi, les deux types peuvent être complémentaires et chacune est adaptée pour répondre à des besoins différents.

Une troisième méthode d'élicitation existe, la méthode Delphi [Cooke,1991]. Elle se base sur des élicitations individuelles des experts qui peuvent ainsi s'exprimer librement et sans influence. Un retour anonyme de toutes les réponses est ensuite envoyé aux experts qui peuvent reconsidérer leurs réponses en fonction de celles des autres. Ce processus est réitéré jusqu'à l'aboutissement à un consensus ou la justification des divergences.

### *e- Agrégation et modélisation des réponses des experts*

Plusieurs méthodes d'agrégation sont proposées dans la littérature. On peut citer la moyenne, la médiane, la moyenne géométrique,... On peut attribuer lors de cette agrégation différents poids aux opinions des experts pour opérer des moyennes pondérées. On peut utiliser aussi la démarche bayésienne comme dans STUK-VTT.

Pour l'agrégation des réponses, la méthode TUD propose l'utilisation d'un logiciel (EXCALIBR par exemple [Cooke,2000]).

La modélisation de l'expertise utilise généralement les méthodes statistiques classiques fréquentielles ou bayésiennes. Dans [Lannoy et Procaccia, 2001], les auteurs exposent les bases statistiques de la modélisation de l'expertise illustrées par des applications.

Suite au recueil et à l'analyse des expertises, certaines méthodes recommandent la réalisation d'une étude de sensibilité, consistant à mesurer l'impact des expertises recueillies sur le résultat final. Ceci peut justifier une reprise de l'enquête ou une enquête complémentaire [Lannoy et Procaccia, 2001].

#### *f- Synthèse et capitalisation*

Les premiers résultats sont communiqués aux experts. Ces résultats peuvent être revus et ajustés une dernière fois avant l'élaboration d'un rapport final qui permet de capitaliser l'ensemble de l'étude et qui est communiqué aux experts. La capitalisation peut être faite aussi sous la forme d'une base de données par exemple, ce qui facilite l'accès rapide et ciblé à l'information.

## **3.3 Le jugement d'expert pour l'anticipation**

L'analyse fonctionnelle, les documents de conception et particulièrement les études OMF peuvent renseigner sur les défaillances potentielles d'un matériel. Le retour d'expérience donne quant à lui des informations sur les défaillances avérées d'un matériel. Mais, si les conditions d'environnement ou d'exploitation ou de maintenance ou la durée d'exploitation du matériel changent par rapport à celles considérées à la conception, seule l'expertise peut permettre d'anticiper l'impact de ces changements. En s'appuyant sur les données existantes, l'expert peut identifier les défaillances potentielles qui pourraient éventuellement apparaître à la suite de ces changements. C'est donc un acteur important dans le processus d'anticipation

Dans ce qui suit, le besoin en jugement d'expert sera décrit pour l'anticipation des défaillances. Un certain nombre de spécifications pour une méthode de recueil de jugement d'expert sont proposées.

### **3.3.1 Besoin du jugement d'expert pour l'anticipation des défaillances**

Dans [Lannoy et Procaccia, 2001], les auteurs énumèrent quatre situations nécessitant le recours au jugement d'expert en sûreté de fonctionnement :

- a- Compléter, valider, interpréter et intégrer des données existantes, apprécier l'impact d'une modification (de conception, de fabrication, d'exploitation, de maintenance ou d'environnement),
- b- Estimer l'occurrence d'événements futurs, prévoir les conséquences d'une décision,
- c- Déterminer un état des connaissances d'un domaine,
- d- Fournir les éléments de décision nécessaires aux décideurs, lorsque plusieurs options se présentent.

L'anticipation est concernée par trois des situations précédemment décrites. En effet, dans un premier temps, il s'agit de compléter et de valider les données de retour d'expérience qui permettent d'identifier un certain nombre de défaillances avérées. Il s'agit ensuite d'apprécier l'impact des modifications par rapport à la conception initiale (par exemple, la prolongation de la durée d'exploitation des matériels au-delà de la durée prévue à la conception), puis, d'estimer l'occurrence d'événements futurs, événements que l'expert devra identifier et dont il devra juger la criticité. Finalement, l'expert doit fournir les éléments de décision nécessaires aux décideurs pour choisir une alternative qui permette d'éviter ou de retarder les défaillances potentielles identifiées.

### **3.3.2 Spécifications d'une méthode d'interrogation d'experts pour l'anticipation des défaillances**

La méthode doit permettre à l'analyste de solliciter l'expert afin qu'il anticipe les défaillances potentielles d'un matériel donné, considéré critique, en s'appuyant sur ses propres connaissances et sur les données collectées par l'analyste. Ainsi, l'objectif de la méthode est de stimuler la créativité de l'expert afin d'anticiper des défaillances qui n'ont jamais eu lieu. Dans cette optique, une méthode d'expertise pour l'anticipation doit satisfaire plusieurs fonctions et contraintes.

#### **Faire preuve d'originalité**

Dans l'anticipation, on ne demande pas seulement à l'expert de rapporter les connaissances qu'il détient sous forme tacite, mais aussi de faire preuve d'un effort d'imagination et de créativité pour anticiper un événement. Des élicitations collectives peuvent favoriser cette créativité en permettant l'échange et la confrontation entre les experts.

#### **Respecter un certain nombre de contraintes**

##### *Temps de l'étude limité et experts peu disponibles*

Cette contrainte va restreindre le choix par rapport au type d'élicitation retenu. Elle privilégie plutôt le choix des entretiens individuels dès que possible. Toutefois, un retour vers les experts, inspiré de la méthode Delphi, n'est pas à exclure, puisqu'il permet d'avoir des résultats plus fiables.

##### *Réticences des experts par rapport à l'élicitation*

Il est souvent difficile pour les experts de donner directement des probabilités ou de traduire leurs connaissances dans un format imposé, particulièrement s'ils le jugent inadapté. L'analyste doit donc simplifier l'aspect probabiliste, en posant les questions qualitatives adéquates pour les traduire lui-même par la suite en probabilité. Il doit aussi s'informer le plus possible sur le sujet de l'interrogation afin de pouvoir dialoguer convenablement avec les experts et entamer ainsi avec eux un dialogue constructif. Il appartient finalement à l'analyste de motiver les experts et de susciter leur intérêt pour l'étude en présentant ses apports pour eux. En effet, ce genre de démarche aboutit généralement à l'enrichissement des connaissances de tous sur le sujet. La confrontation des connaissances des experts leur permet de procéder à un état des lieux de leurs connaissances.

Il est aussi important pour l'expert de pouvoir s'exprimer sans les contraintes ou pressions que peuvent présenter les groupes interactifs.

### 3.3.3 Classification des méthodes d'interrogation d'experts par rapport aux besoins de l'anticipation

#### 3.3.3.1 L'objectif

Afin de comparer les méthodes étudiées, on s'est proposé de les classer par rapport à leur adaptation à l'anticipation et à l'effort qu'elles nécessitent, dans un diagramme anticipation/effort. Cet exercice a pour objectif d'identifier les méthodes les plus intéressantes pour l'anticipation et qui ne nécessitent pas de gros efforts de mise en œuvre.

L'axe des abscisses, représentant l'effort nécessaire de mise en œuvre, traduit la facilité d'application de la méthode. Cet effort prend en compte le nombre d'experts à interroger, le nombre d'élicitations à effectuer, la durée de la mise en œuvre et le degré de complexité des différentes étapes de l'interrogation et des outils utilisés.

L'axe des ordonnées, plus spécifique à l'anticipation, permet d'évaluer le degré d'adaptation de la méthode à cette problématique. Cet aspect tient compte des objectifs de la démarche, des différentes applications réalisées avec la méthode, de la pluridisciplinarité des équipes d'experts et de l'adaptation des outils utilisés aux besoins de l'anticipation.

- La partie en haut et à droite de la figure 3.1, partie 1, présente des méthodes plutôt adaptées à l'anticipation, mais nécessitant de grands efforts d'élicitation.
- Les parties du bas, parties 2 et 3, regroupent les méthodes peu adaptées à l'anticipation.
- La partie en haut et à gauche, partie 4 correspond aux méthodes adaptées à l'anticipation et ne nécessitant pas de grands efforts de mise en œuvre. On choisira donc de préférence la (ou les) méthode(s) positionnée(s) dans ce quadrant.

Adaptation à l'anticipation

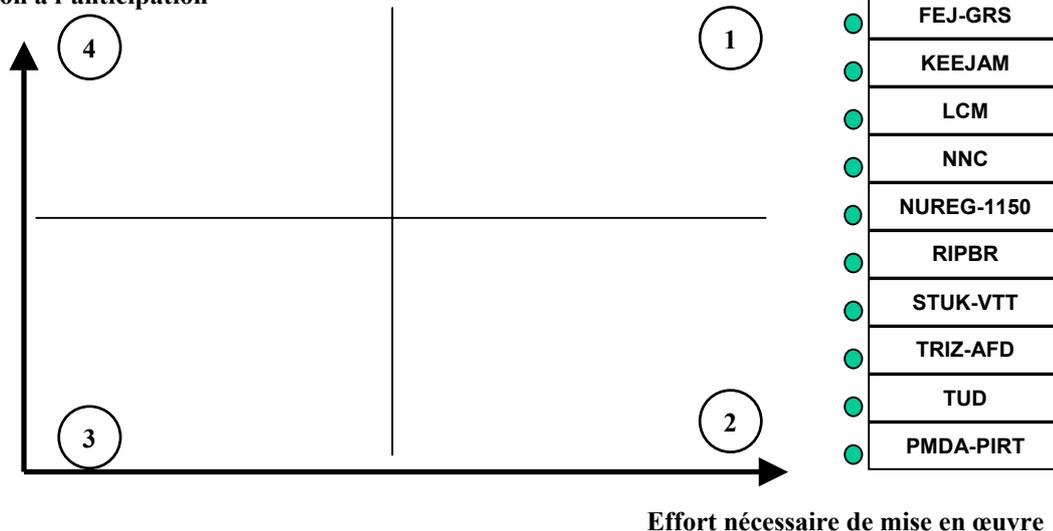


Figure 3.1 : Schéma pour la classification des méthodes d'interrogation d'experts.

#### 3.3.3.2 Les experts interrogés

Pour classer ces méthodes, six experts pluridisciplinaires ont participé à l'étude :

*un expert en retour d'expérience et en fiabilité*

*un expert en maintenance,*

*un expert en génie industriel,*

*un expert en méthodes d'interrogation d'experts pour des applications d'évaluation probabiliste de sûreté ayant participé à la construction de la méthode STUCK-VTT et à l'exercice de comparaison des six méthodes d'expertise [Cojazzi, 2000] ,*

*un expert en gestion des connaissances,*

*toutes ces personnes ont déjà participé à plusieurs exercices d'interrogation d'experts.*

*et enfin moi-même en tant qu'analyste.*

### 3.3.3.3 Les données d'entrée

Les données d'entrées de cet exercice sont les fiches méthodologiques (présentées au paragraphe 3.2.1)

### 3.3.3.4 La préparation des questions

Un premier contact avec les experts a permis de leur communiquer les objectifs de l'exercice et les données d'entrée (les fiches méthodologiques).

On a demandé ensuite aux experts de donner pour chaque méthode, le degré d'adaptation à la problématique de l'anticipation et une estimation de l'effort de mise en œuvre de la méthode sous la forme de pourcentages. D'autre part, les experts ne connaissant pas de la même manière toutes les méthodes. Il leur est demandé de donner des degrés de confiance par rapport à leur expertise en associant à chaque méthode un indice compris entre 0 et 2 (c'est le poids) :

0 : méthode peu connue par l'expert,

1 : méthode connue par l'expert,

2 : méthode bien connue par l'expert.

Ces questions ont été envoyées aux experts sous la forme suivante (figure 3.2) :

NOM :  
complétez le tableau suivant :

La colonne 1 : Quel est le niveau d'adaptation de la méthode à l'anticipation ?  
La colonne 2 : Quel est l'effort nécessaire pour la mise en œuvre de cette méthode ?  
La colonne 3 : Attribuer un poids à la méthode  
0 : méthode pas connue,  
1 : méthode peu connue,  
2 : méthode bien connue.

Méthode	Adaptation à l'anticipation	Effort de mise en œuvre	Poids
NUREG -1150			
STUCK-VTT			
NNC			
FEJ-GRC			
KEEJAM			
CTN-UPM			
TUD			
LCM			
TRIZ-AFD			
RIPBR			
PMDA-PIRT			

Remarques

**Figure 3.2 : Questionnaire pour la classification des méthodes d'interrogation d'experts.**

### 3.3.3.5 L'élicitation

Suite à cette première élicitation faite de manière individuelle, un premier retour de l'ensemble des résultats vers les experts a été présenté de manière anonyme. Une deuxième élicitation a permis aux participants de revoir leurs valeurs, en reconsidérant particulièrement les valeurs extrêmes et d'en modifier certaines après l'examen des premiers résultats. C'est le principe de la méthode Delphi [Cooke, 1991].

### 3.3.3.6 Les résultats de l'élicitation et l'agrégation

Les poids attribués par les experts sont donnés dans le tableau 3.1. Les tableaux 3.2 et 3.3 donnent respectivement, la classification selon la deuxième expertise des méthodes par rapport à l'anticipation et par rapport à l'effort de mise en œuvre.

**Tableau 3.1 : Poids attribués par les experts aux différentes méthodes (Deuxième expertise)**

Méthode	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6
NUREG -1150	2	2	0	1	2	0
STUCK-VTT	2	1	0	0	1	0
NNC	2	0	0	1	1	0
FEJ-GRC	2	0	0	0	1	0
KEEJAM	2	2	0	1	1	1
CTN-UPM	1	0	0	0	1	0
TUD	0	0	0	0	2	0
LCM	0	2	2	2	1	0
TRIZ-AFD	0	1	1	2	1	1
RIPBR	0	0	0	1	2	0
PMDA-PIRT	0	1	0	0	1	0

**Tableau 3.2 : Classification des méthodes par rapport à l'anticipation (Deuxième expertise)**

Méthode	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6	Moyenne pondérée
NUREG -1150	70	55	0	50	70	0	63
STUCK-VTT	80	70	0	0	50	0	70
NNC	20	0	0	50	50	0	35
FEJ-GRC	30	0	0	0	30	0	30
KEEJAM	60	70	0	80	40	50	61
CTN-UPM	65	0	0	0	30	0	47
TUD	0	0	0	0	30	0	30
LCM	0	70	80	75	75	0	75
TRIZ-AFD	0	90	100	90	80	50	90
RIPBR	0	0	0	80	90	0	87
PMDA-PIRT	0	90	0	0	100	0	95

Tableau 3.3 : Classification des méthodes par rapport à l'effort de mise en œuvre (Deuxième expertise).

Méthode	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6	Moyenne pondérée
NUREG -1150	60	60	0	75	60	0	62
STUCK-VTT	50	60	0	0	50	0	53
NNC	30	0	0	70	40	0	43
FEJ-GRC	60	0	0	0	90	0	70
KEEJAM	80	75	0	75	90	90	81
CTN-UPM	50	0	0	0	60	0	55
TUD	0	0	0	0	70	0	70
LCM	0	20	50	55	50	0	43
TRIZ-AFD	0	75	50	20	50	60	46
RIPBR	0	0	0	60	70	0	67
PMDA-PIRT	0	60	0	0	90	0	75

Les valeurs en gris foncé sont celles modifiées entre la première et la deuxième élicitation. L'agrégation des résultats a été faite en calculant la moyenne pondérée.

### 3.3.3.7 Le diagramme anticipation/effort

Adaptation à l'anticipation

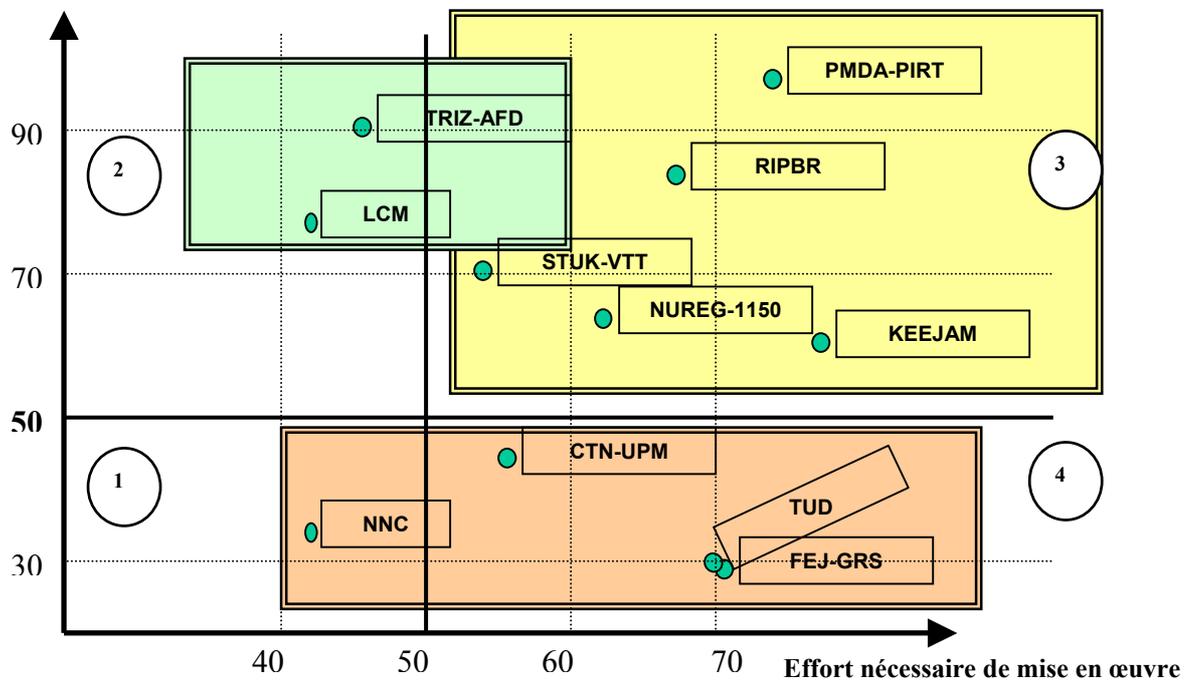


Figure 3.3 : Classification des méthodes d'interrogation d'experts.

### 3.3.3.8 Synthèse de la classification

Cette classification permet d'identifier trois familles de méthodes (voir figure 3.3):

**La famille 1** se situe dans les quadrants 1 et 4 du diagramme ; elle englobe les méthodes CTN-UPM, NNC, TUD et FEJ-GRS ; ces méthodes n'ont pas d'intérêt pour l'anticipation.

**La famille 2** se situe dans le quadrant 2 du diagramme ; elle est constituée par les méthodes TRIZ-AFD et LCM. Ces deux méthodes correspondent bien aux besoins de l'anticipation et ne nécessitent pas beaucoup d'efforts de mise en œuvre. Cependant, chacune répond partiellement aux besoins de l'anticipation :

- TRIZ-AFD permet d'identifier des défaillances et des solutions de maintenance, mais ne donne pas les moyens de les évaluer.

- LCM permet d'identifier et d'évaluer des solutions de maintenance par rapport à des défaillances connues. Elle préconise la surveillance systématique des matériels critiques et propose des solutions en cas de défaillance avérée. Cette méthode réactive ne permet pas d'anticiper des défaillances qui ne se sont jamais produites.

**La famille 3** se situe dans le quadrant 3 du diagramme, elle englobe les méthodes PMDA-PIRT, RIPBR, STUCK-VTT, NUREG-1150, KEEJAM. Toutes ces méthodes sont intéressantes pour l'anticipation, mais nécessitent de gros efforts de mise en œuvre. Il est alors nécessaire d'identifier pour chaque méthode d'une part les points intéressants qui pourraient être intégrés dans une démarche globale d'anticipation et d'autre part les points faibles qu'il faut éviter.

### 3.3.4 Critique des méthodes par rapport à l'anticipation

Le tableau 3.4 résume les caractéristiques intéressantes de chaque méthode vis-à-vis de l'anticipation ainsi qu'un certain nombre de critiques qui reprennent les principaux points faibles.

**Tableau 3.4 : Critique des méthodes par rapport à l'anticipation.**

Méthode	Principal intérêt pour l'anticipation	Principal point faible
<b>NUREG – 1150</b>	L'élicitation sur deux modes, collectif et individuel, correspond assez bien aux besoins de l'anticipation (créativité et analyse).	L'entraînement des experts aux notions de probabilités constitue une contrainte.
<b>STUK-VTT</b>	L'utilisation des réseaux bayésiens pour faciliter l'interrogation d'experts non familiarisés avec les notions de probabilité présente un aspect intéressant.	La méthode est plus adaptée à l'estimation quantitative de paramètres (exemple : paramètres physiques).
<b>NNC</b>	L'utilisation de groupes d'experts multidisciplinaires correspond aux besoins de l'anticipation.	La méthode est peu formalisée.
<b>FEJ-GRC</b>	La décomposition des objectifs et l'utilisation de groupes d'experts multidisciplinaires correspondent aux besoins de l'anticipation.	La méthode est complexe et difficile à mettre en œuvre, car elle implique plusieurs groupes d'experts.

<b>KEEJAM</b>	Cette méthode basée sur l'ingénierie des connaissances est intéressante pour l'anticipation du point de vue de la capitalisation des connaissances.	La méthode est complexe et coûteuse à mettre en œuvre (processus long en 15 points).
<b>CTN-UPM</b>	La méthode permet d'avoir des estimations quantitatives, elle semble plus adaptée à l'analyse.	Cette méthode est expérimentale, encore en cours de développement.
<b>TUD</b>	La méthode permet d'avoir des estimations quantitatives, elle semble aussi plus adaptée à l'analyse.	La méthode est complexe et coûteuse à mettre en œuvre.
<b>LCM</b>	Elle présente des objectifs communs (gestion du vieillissement) mais l'aspect d'anticipation est insuffisamment développé. Méthode très simple et peu coûteuse.	C'est une méthode systématique qui ne laisse pas place à la créativité, elle ne permet pas de mettre en évidence des défaillances nouvelles.
<b>TRIZ-AFD</b>	Cette méthode d'anticipation est surtout bien adaptée pour le choix de solutions à mettre en place pour remédier à une défaillance. Elle ne permet pas de répondre aux questions concernant la pertinence et la criticité des défaillances potentielles.	Cette méthode est expérimentale, encore en évolution.
<b>RIPBR</b>	Cette méthode d'optimisation de la maintenance est finalement proche de nos préoccupations. Elle exprime clairement le besoin d'intégrer une approche d'anticipation basée sur l'expertise.	Cette démarche est encore en évolution.
<b>PMDA-PIRT</b>	Cette méthode correspond parfaitement aux besoins de l'anticipation, bien qu'elle s'arrête à l'identification et à la hiérarchisation des mécanismes de dégradation potentiels. Ces résultats constituent une donnée d'entrée pour la gestion de la maintenance et du cycle de vie des matériels critiques dans les centrales nucléaires.	Cette démarche est difficile à mettre en œuvre parce qu'elle implique plusieurs experts sur une longue période de temps. Elle reste encore théorique, puisque aucune application n'a encore été faite pour la valider.

### 3.3.5 Apports et conclusions de l'analyse

Cette analyse bibliographique révèle qu'aucune des méthodes étudiées ne permet de répondre de manière globale aux besoins de l'anticipation. Elle a permis, cependant, de mettre en évidence des caractéristiques intéressantes pour la construction d'une méthode d'interrogation d'experts adaptée à l'anticipation :

1- L'intérêt de s'inspirer des méthodes d'aide à la créativité. En effet, ce concept existe dans TRIZ-AFD qui s'appuie sur la méthode TRIZ. Cet aspect peut être très intéressant pour l'identification des mécanismes de dégradation potentiels et pour l'identification des parades potentielles.

2- L'interrogation sur deux modes d'élicitation : collectif et individuel. C'est le cas dans la méthode NUREG-1150. Selon les objectifs de l'interrogation, on choisit le meilleur type d'élicitation qui répond le mieux au besoin et qui est le plus simple à mettre en œuvre.

3- La décomposition de la problématique en plusieurs étapes et l'élicitation d'experts pluridisciplinaires comme dans la méthode FEJ-GRC.

4- Le besoin de formalisation des échanges entre les experts et le besoin de capitalisation (KEEJAM, STUK-VTT),

5- Le besoin de simplification de l'aspect « probabilités » pour les experts et de structuration des résultats. Cet aspect est traité dans la méthode STUK-VTT au moyen des réseaux bayésiens. Cet outil a été choisi pour les étapes 2 et 3 du processus d'anticipation. Son utilisation dans cette méthode vient donc conforter ce choix.

## 3.4 Intégration de l'interrogation d'experts dans la démarche d'anticipation

L'interrogation d'experts intervient dans la phase 3 de la démarche d'anticipation : le processus d'anticipation (voir paragraphe 2.4, figure 2.4). A chaque étape de ce processus, on peut alors appliquer le processus d'interrogation d'experts en six points identifié dans ce chapitre suite à l'analyse des méthodes (voir figure 3.4) :

### 3.4.1 Intégration de l'interrogation d'experts dans le processus d'anticipation.

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à l'intégration du processus d'interrogation d'experts dans les différentes étapes de l'anticipation.

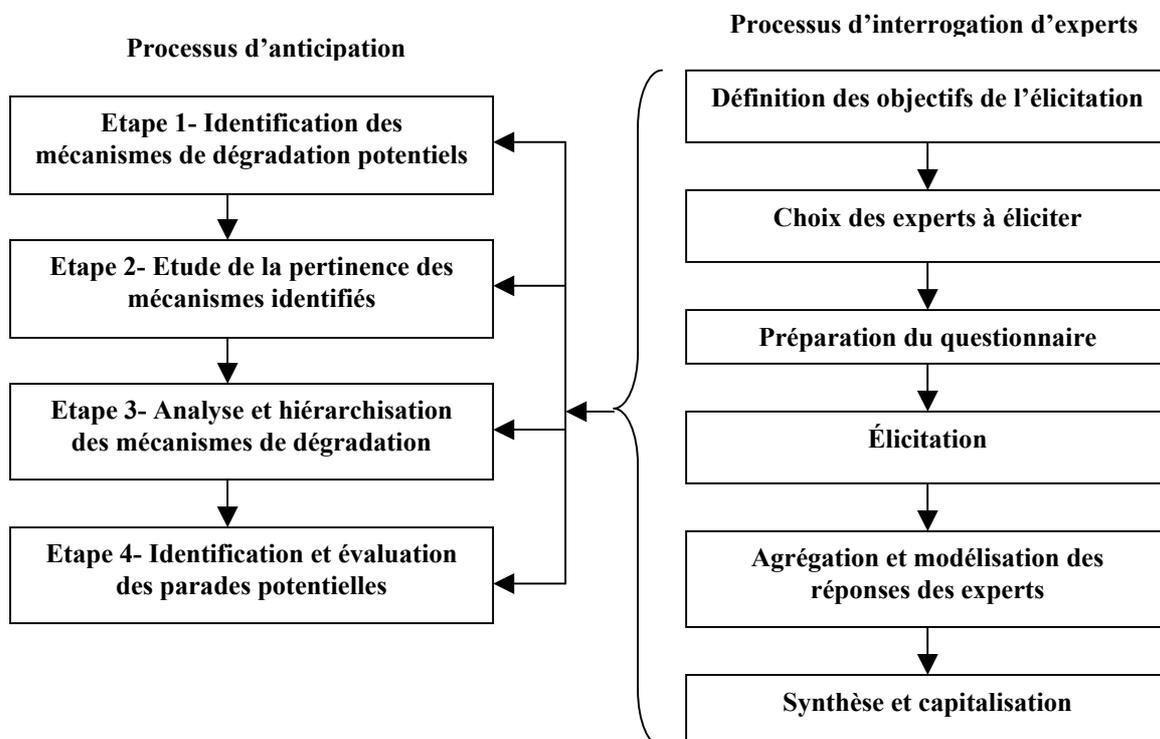


Figure 3.4 : Processus d'anticipation et processus d'interrogation d'experts.

### 3.4.1.1 Définition des objectifs de l'élicitation

Les objectifs de l'élicitation doivent être clairement définis. Ils sont communiqués aux experts lors de l'envoi de l'ordre du jour de la réunion. A titre d'exemple nous donnons ici l'objectif de l'étape 1 du processus d'anticipation : identifier les mécanismes de dégradation potentiels d'un matériel qui pourraient être nuisibles à son fonctionnement et particulièrement vers la fin de sa durée d'exploitation.

### 3.4.1.2 Choix des experts à éliciter

Lors de ce point il s'agit d'identifier les experts à interroger. Pour cela deux actions sont à mener : l'identification des experts et la sélection des experts.

#### *a. Identification des experts*

Dans un premier temps, il s'agit d'identifier les experts qui peuvent participer à l'expertise. Comme on cherche à constituer une équipe pluridisciplinaire, il faut définir les différentes compétences souhaitées et identifier ainsi les experts concernés. Comme cela est décrit dans le paragraphe 2.4.2, il est nécessaire d'interroger des experts en matériaux et des experts « cycle de vie du matériel ». Ces derniers sont : l'expert de conception, l'expert d'ingénierie, l'expert d'exploitation et les experts de maintenance du matériel.

Nous recommandons pour cela la procédure d'identification des experts, appelée « round robin », proposée par la méthode TUD [Cooke,2000] (voir paragraphe 3.2.2, b-, L'identification des experts). Par la suite, il faut sélectionner les experts qui participeront à l'étude. Pour cela il faut établir des critères de choix.

#### *b. Sélection des experts*

Bien que dans [Lannoy et Procaccia, 2001], lorsqu'il s'agit d'agréger les expertises de plusieurs experts, on atteste que l'expertise « vague » des moins bons experts peut s'avérer aussi utile que les opinions pointues des bons experts, ceci n'est pas vrai dans le cas de l'anticipation. En effet, lorsqu'on anticipe des événements qui n'ont jamais eu lieu, aucun retour d'expérience n'existe pour préciser les résultats de l'expertise sauf peut être le retour d'expérience de matériels analogues. C'est pour cette raison que l'on a choisi la compétence des experts comme premier critère de choix des experts. Le second critère qui conditionne la réussite de l'interrogation d'experts est la motivation des participants ; c'est donc le deuxième critère de choix. Un troisième critère concerne la disponibilité des experts.

Cette procédure est valable pour toutes les étapes du processus d'anticipation. Rappelons que le nombre minimal d'experts est fixé à 5 dans [Clemen et Winkler, 1985] et à 4 dans la méthode TUD.

Nous présentons pour chacune des étapes du processus d'anticipation les experts à interroger (voir tableau 3.5).

#### **Étape 1- Identification des mécanismes de dégradation potentiels (pour un matériel passif) et des modes de défaillance potentiels**

Les experts auxquels on peut s'adresser dans cette étape sont l'expert de conception, l'expert d'ingénierie, l'expert d'exploitation et l'expert de maintenance du matériel, qu'on peut aussi appeler experts « cycle de vie » du matériel et les experts en matériaux.

### **Etape 2- Étude de la pertinence des mécanismes potentiels identifiés**

Pour cette étape, ce sont les experts en matériaux (expert en mécanismes de dégradation) qui sont les plus aptes à fournir les informations nécessaires pour répondre à cette question. La participation des experts « cycle de vie » du matériel peut toutefois enrichir cette expertise.

### **Etape 3- Analyse et hiérarchisation des mécanismes de dégradation**

Pour cette étape on a besoin d'interroger les experts « cycle de vie » du matériel et les experts en matériaux pour évaluer la cinétique des mécanismes potentiels et pour décrire les défaillances qu'ils peuvent provoquer : modes et effets du vieillissement, gravité des conséquences des défaillances en termes de sûreté, de disponibilité, de coûts et d'image. Les experts en matériaux sont particulièrement compétents pour se prononcer sur la cinétique des mécanismes et sur les modes ou les effets qu'ils induisent. Les experts en maintenance peuvent quant à eux déterminer l'efficacité de la maintenance actuelle et se prononcer sur le besoin de nouvelles parades.

### **Etape 4- Identification et évaluation des parades potentielles pour les défaillances critiques**

Ces parades peuvent être des modifications dans la politique d'exploitation, des modifications dans la politique de maintenance préventive ou encore des solutions de remplacement du matériel (dans ce cas peut se poser la question de la re-conception du matériel). Il est donc nécessaire durant cette étape d'avoir la participation des experts « cycle de vie » du matériel et particulièrement les experts en maintenance.

Pour l'évaluation des parades en terme d'efficacité et de coûts, ce sont les experts de maintenance qui sont les mieux placés pour y répondre. Notons qu'on distingue à EDF trois types d'experts en maintenance :

- 1- les experts de maintenance sur le site d'exploitation du matériel : ce type d'expert peut renseigner sur les conséquences d'une défaillance et sur l'impact sur le vieillissement et la criticité concernant le matériel implanté sur site.
- 2- les experts de maintenance de services centraux, qui travaillent sur la stratégie de maintenance : ces experts peuvent nous renseigner sur les solutions possibles et leur efficacité,
- 3- les experts de maintenance qui travaillent dans les services centraux sur la réparabilité, la maintenabilité (outillage, dosimétrie), le soutien logistique et les coûts.

#### **3.4.1.3 Préparation du questionnaire**

Ce point dépend du type d'élicitation : collective ou individuelle, et des méthodes ou outils à mettre en œuvre pour répondre au mieux aux objectifs de l'élicitation. Plusieurs questions se posent alors lors de la construction des questionnaires :

- Pour les réunions collectives : comment animer les réunions ? Comment stimuler les experts ? Comment favoriser les échanges entre les experts ?
- Pour les réunions individuelles : comment poser les questions de manière compréhensible par les experts (faciliter les aspects probabilistes) ? Sous quelle forme présenter les questionnaires (tableaux, questions à choix multiple, ...)?

Pour répondre à ces questions une analyse plus approfondie est présentée aux chapitres 4 et 5.

### 3.4.1.4 Élicitation

L'élicitation peut se faire dans le cadre de réunions collectives ou de réunions individuelles. Nous présentons pour chacune des étapes du processus d'anticipation le type de réunion le plus adapté (voir tableau 3.5).

#### Étape 1- Identification des mécanismes de dégradation potentiels (pour un matériel passif) et des modes de défaillance potentiels

Sachant que l'échange entre les experts peut favoriser l'émergence de nouvelles idées, l'interrogation collective semble bien adaptée à cette étape qui nécessite de l'imagination et de la créativité.

#### Étape 2- Étude de la pertinence de ces mécanismes

Une élicitation individuelle permet de répondre à cette étude. En effet, les élicitations collectives étant plus difficiles à organiser en raison de l'indisponibilité des experts, il est important de privilégier les entretiens individuels dès qu'ils s'avèrent suffisants pour répondre aux besoins. Toutefois, pour un mécanisme de dégradation donné, l'avis de plusieurs experts permet d'augmenter la validité des résultats. Pour cela, on propose d'effectuer au moins une validation des résultats de la première expertise par un deuxième expert.

#### Étape 3- Analyse et hiérarchisation des mécanismes de dégradation

Des interrogations individuelles répondent convenablement aux besoins de cette étape.

#### Étape 4- Identification et évaluation des parades potentielles pour les défaillances critiques

Comme pour l'étape 1, l'interrogation collective semble ici bien adaptée. On peut avoir recours éventuellement à des entretiens individuels complémentaires.

**Tableau 3.5 : Experts et types d'entretiens pour le processus d'anticipation.**

Étape	Type d'entretien	Experts
<b>Étape 1-</b> Identification des mécanismes de dégradation potentiels	Réunion collective	Experts matériaux Experts cycle de vie
<b>Étape 2-</b> Étude de la pertinence de ces mécanismes à 60 ans	Entretiens individuels	Experts matériaux (Experts cycle de vie, si possible)
<b>Étape 3-</b> Analyse et hiérarchisation des mécanismes de dégradation	Entretiens individuels	Experts matériaux Experts cycle de vie
<b>Étape 4-</b> Identification et évaluation des parades potentielles pour les mécanismes critiques	Réunion collective, éventuellement des entretiens individuels	Experts cycle de vie (particulièrement les experts maintenance)

### 3.4.1.5 Agrégation et modélisation des réponses des experts

Pour les réunions collectives, ce point n'est pas nécessaire puisque l'objectif est que les experts aboutissent à un consensus lors de la réunion.

Pour les interrogations individuelles, une agrégation des différents avis d'experts est nécessaire. La méthode d'agrégation dépend alors de la structure des résultats. Les méthodes choisies seront présentées dans le chapitre 7 dans le cadre de l'application de la démarche.

### 3.4.1.6 Synthèse et capitalisation

Un compte rendu de réunion, donnant une synthèse des résultats de l'élicitation, doit être rédigé et envoyé à l'ensemble des participants. Ceci est valable pour toutes les étapes du processus d'anticipation. Ce compte rendu doit être pris en compte dans la phase 4 de la démarche : la capitalisation.

### 3.4.2 La stimulation et l'analyse dans l'anticipation

D'après la description précédente, nous pouvons dire que du point de vue de l'interrogation d'experts, le processus d'anticipation peut être décomposé en deux parties (voir figure 3.5).

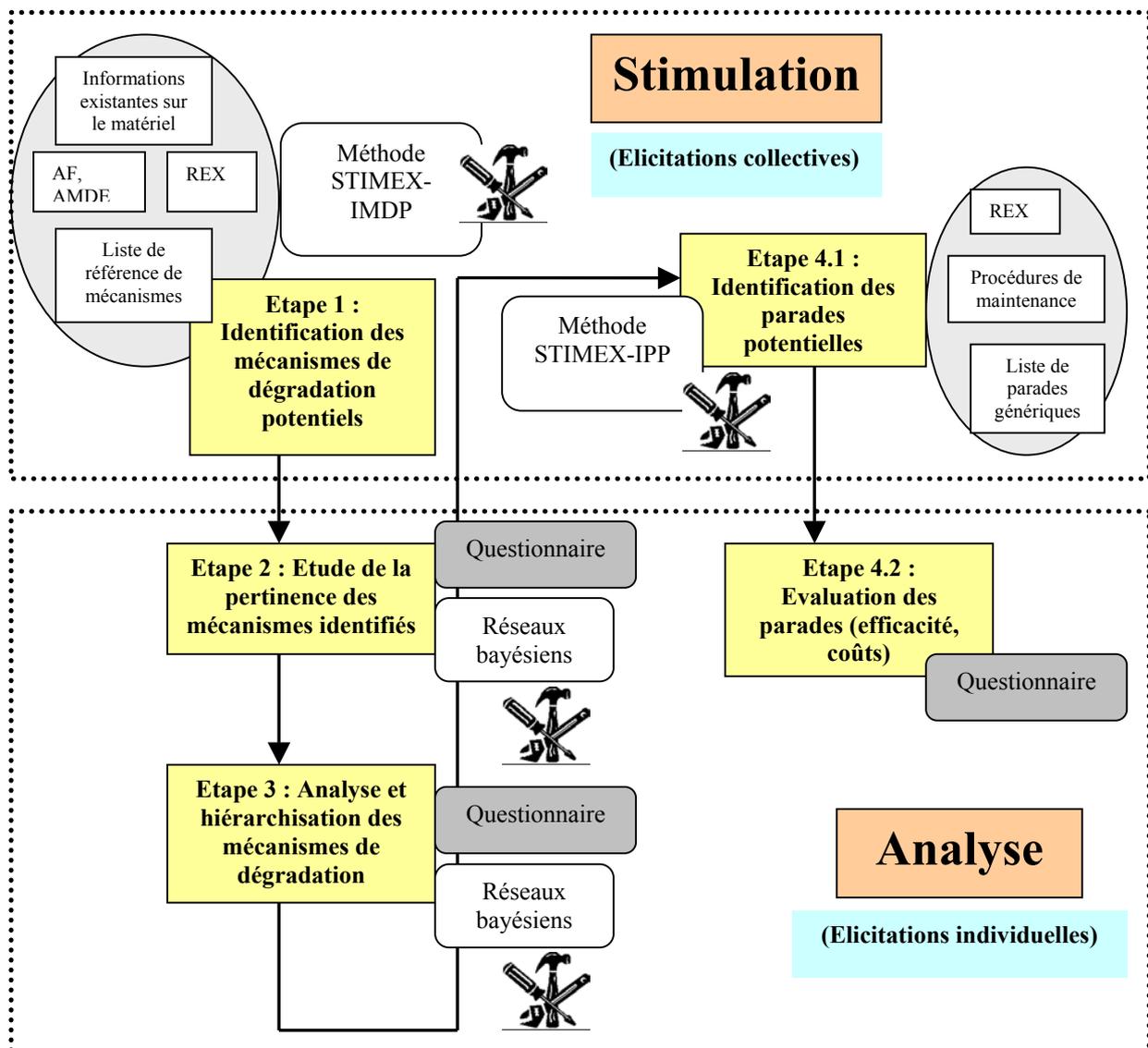


Figure 3.5 : Répartition des étapes de l'anticipation entre stimulation (élicitations collectives) et analyse (élicitations individuelles).

- **La stimulation** : elle regroupe les étapes 1 d'identification de mécanismes de dégradation et 4 d'identification de parades potentielles. Pour ces étapes, une interrogation collective favorisant l'émergence de nouvelles idées est privilégiée. La figure 3.5 permet d'associer aux deux étapes de cette partie de stimulation, les données d'entrée et la méthode proposée.

- **L'analyse** : elle regroupe les étapes 2, 3 et 4 du processus d'anticipation. Les interrogations individuelles, plus faciles à organiser que celles collectives, conviennent bien à cette analyse. La figure 3.5 permet d'associer aux trois étapes de partie d'analyse, les outils proposés.

## Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, une analyse bibliographique de méthodes existantes a permis de déterminer un processus générique d'une méthode d'interrogation d'experts en six points.

Cette étude a permis en outre de mettre en évidence des caractéristiques intéressantes pour la construction d'une méthode d'interrogation d'experts adaptée à l'anticipation.

Finalement, un dernier paragraphe illustre l'intégration de l'interrogation d'experts dans le processus d'anticipation. Dans ce cadre, les experts à solliciter et le type d'élicitation ont été déterminés pour chaque étape de l'anticipation. Deux aspects de ce processus ont alors été mises en évidence : la stimulation et l'analyse.

Dans le chapitre 4 suivant, la construction de deux méthodes de stimulation est présentée. Elle correspond à la préparation de l'élicitation pour les étapes 1 et 4 du processus d'anticipation : l'identification des mécanismes de dégradation potentiels et l'identification des parades potentielles. Pour ces étapes, le besoin de s'inspirer de méthodes d'aide à la créativité dans le cadre de réunions collectives d'experts pluridisciplinaires a été mis en évidence. C'est pour cela qu'une première partie de ce chapitre 4 sera consacrée à une étude bibliographique des méthodes d'aide à la créativité.

## Chapitre 4

---

### La stimulation d'experts pour l'anticipation

---

Nous nous intéressons dans cette partie à la stimulation d'experts pour l'anticipation. Cette stimulation intervient dans les réunions collectives d'experts en vue d'identifier, dans un premier temps, les mécanismes de dégradation potentiels d'un matériel, et dans un deuxième temps, les solutions ou parades à mettre en place face à une manifestation de vieillissement sur le matériel étudié.

Cette stimulation a pour objectif de sortir les experts de leur travail quotidien, c'est à dire le suivi, l'analyse et le traitement des mécanismes de dégradation, les bilans de comportement et de fonctionnement. Il s'agit de les amener à réfléchir sur de nouvelles éventualités qui résulteraient des diverses évolutions que pourrait subir le matériel lors de son exploitation, comme une prolongation de sa durée de vie, une modification de son régime d'exploitation ou de son programme de maintenance.

Pour aborder ce concept de stimulation, un intérêt particulier a été accordé aux méthodes de résolution de problèmes et d'aide à la créativité. La complexité, essentiellement due au nombre important de méthodes, nous a amené à étudier les différentes typologies existantes de ces méthodes. Ces typologies permettent alors de s'orienter vers un groupe particulier de méthodes selon le besoin. De plus, des notions de base liées à tout problème de recherche d'idées neuves ont été mises en évidence par Altshuller lors de l'application de sa méthode TRIZ [Cavallucci et Lutz, 1998].

Nous nous sommes alors inspirés de l'ensemble de ces concepts pour structurer les réunions collectives nécessaires à la mise en œuvre de la démarche d'anticipation.

## 4.1 L'aide à la créativité

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à l'aide à la créativité comme moyen de stimulation d'experts. Dans [Thiébaud, 2001], l'auteur identifie trois niveaux de créativité dans le cycle de vie d'un produit. Le premier, qui correspond à la naissance du produit, voit apparaître un nombre important d'innovations possibles. Le second, lors de la croissance du produit, s'accompagne d'un faible nombre d'innovations; le produit est en diffusion. Le troisième niveau, correspondant à la maturation, apporte une série d'innovations portant sur la reconception d'éléments du produit, afin, par exemple, de remédier à des défauts, de prolonger la durée de vie ou de diminuer les coûts de production. Notre travail se situe précisément à ce dernier niveau de créativité.

Cependant, nous pensons qu'il existe d'autres solutions possibles, autres que la reconception, pour prolonger la durée de vie d'un produit ou diminuer ses coûts de production, comme par exemple agir sur les paramètres d'exploitation ou modifier le programme de maintenance. Afin d'identifier ces nouvelles solutions les techniques d'aide à la créativité peuvent d'avérer également utiles.

Un très grand nombre de méthodes de créativité existent, et il n'est pas judicieux de les analyser une à une. Nous avons donc procédé de deux manières :

- tout d'abord, en recensant les différentes classifications existantes de méthodes d'aide à la créativité, afin d'identifier une classification appropriée à la stimulation d'experts pour l'anticipation,
- ensuite, indépendamment des méthodes existantes, en identifiant les concepts de base qui constituent un frein à la créativité et les solutions à mettre en œuvre pour surmonter cette difficulté.

### 4.1.1 Classifications des méthodes de créativité

Beaucoup de travaux se sont penchés sur la caractérisation et la comparaison des méthodes de créativité. Dans [Vadcard, 1996], plusieurs types de classifications ont été recensés :

- Jaoui classe les méthodes selon les logiques de leur mise en œuvre [Jaoui, 1994],
- plusieurs classifications se basent sur un processus heuristique de créativité :
  - depuis leur formalisation en 1926, on distingue généralement 4 phases dans le processus heuristique de l'acte créatif : l'imprégnation, l'incubation, l'illumination puis la validation (Wallace, 1926),
  - plus récemment, Jaoui, en se basant sur les travaux de Wallace, identifie 5 phases d'un processus de créativité : la perception, l'analyse, la production, la sélection et l'application [Jaoui, 1994],
- Fustier propose une classification en trois familles : les outils méthodologiques analogiques, antithétiques et aléatoires [Fustier, 1991],
- Degrange propose une classification en deux grandes catégories : les outils logiques et les outils aléatoires [Degrange, 1993].

Vadcard a recensé trente sept méthodes de créativité couramment utilisées en entreprise (voir annexe 2) et il s'est appuyé sur les logiques de mise en œuvre de Jaoui pour les classer [Vadcard, 1996].

Dans [Thiébaud et al, 2001], une comparaison des méthodes a permis de classer les publications sur ce thème de l'aide à la créativité en deux catégories : celles réalisant une combinaison de plusieurs méthodes et celles réalisant une comparaison entre plusieurs méthodes. Un certain nombre de critères de comparaison a été mis en évidence. Un cadre d'utilisation de ces méthodes en entreprise a été défini, ceci afin de permettre aux acteurs de l'entreprise de faire le choix de la méthode la mieux adaptée à leur besoin spécifique.

Dans son article, Thiébaud reprend la liste des méthodes de créativité recensées par Vadcard. A cette liste, élaborée en 1996 et représentative de l'état des connaissances dans le domaine des outils de créativité, l'auteur a ajouté la méthode TRIZ qui venait d'apparaître en France à cette époque et qui ne figurait pas dans la liste de Vadcard. Son positionnement parmi les cinq logiques de mise œuvre de Jaoui reste délicat, car TRIZ propose un ensemble d'outils qui sont transverses par rapport à ces logiques.

### 4.1.2 Les logiques de mise en œuvre d'une méthode de créativité par Jaoui

Hubert Jaoui a mis en évidence quatre logiques de mise en œuvre pour les méthodes de créativité :

- **la logique associative** : son principe repose sur l'exploitation du postulat qu'une association d'idées n'est pas le fruit du hasard et que, contrairement aux apparences, une certaine logique s'établit dans les chaînes associatives (basées sur le contraste, la similitude, la dépendance, la classification, la consonance, ...);
- **la logique analogique** : son principe repose sur l'exploitation de l'établissement de ressemblances entre divers domaines pouvant avoir une communauté de caractères afin d'en déduire des lois, des phénomènes, des idées, etc... ;
- **la logique combinatoire** : son principe repose sur l'exploitation à partir d'une décomposition structurelle ou fonctionnelle d'un objet ou d'un problème, et leur recombinaison de manière systématique ou aléatoire;
- **la logique onirique** : son principe repose sur l'exploitation des processus inconscients (ressorts oniriques et fantasmatiques) et leur introduction volontaire dans le processus créatif ;

Vadcard a ajouté à cette liste de logiques de Jaoui une cinquième logique :

- **la logique aristotélicienne** : les inventeurs d'outils de créativité appartenant au courant classificateur (ou logique) ont mis au point des outils comme « les structures arborescentes où triomphe la démarche cartésienne et qui sont le meilleur soutien de la créativité moderne » selon [Fustier, 1991].

### 4.1.3 La notion d'outil père par Vadcard

Après l'étude des trente sept méthodes recensées et particulièrement de l'analyse des principes fondateurs des outils, Vadcard a mis à jour la notion d'outil père [Vadcard, 1996]. Cette dernière caractérise un outil qui est représentatif d'un concept, d'un mode opérationnel, ... Cette notion implique celle d'outil fils, appartenant à la même famille que leur père, représentant le principe de la famille, mais aussi des variantes mineures. Ainsi, après avoir classé les trente sept méthodes selon les cinq logiques de mise en œuvre citées ci-dessus, l'auteur a associé à chaque classe un outil père (tableau 4.1).

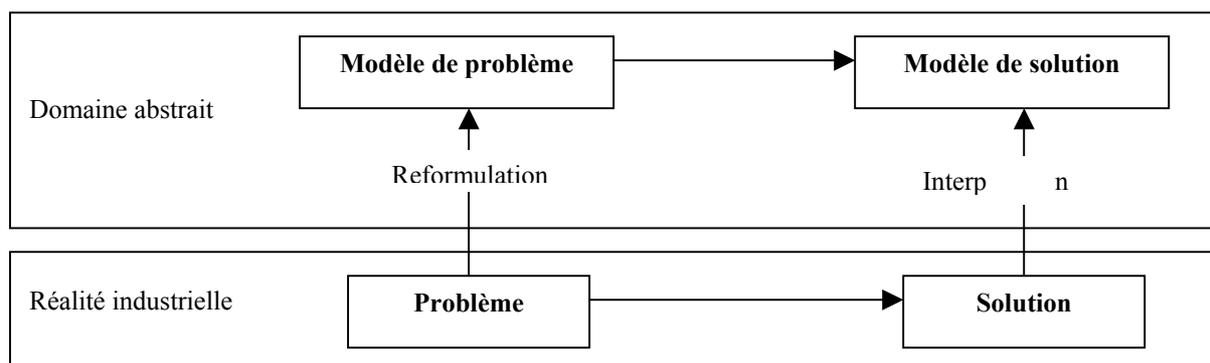
**Tableau 4.1 : Outils pères selon la logique de mise en œuvre [Vadcard, 1996].**

Logique de mise en œuvre	Outil père	Nombre d'outils recensés
Logique associative	Le brainstorming, le remue-méninges, l'orage de cerveau	16
Logique analogique	L'approche analogique	5
Logique combinatoire	Les matrices de découvertes	3
Logique onirique	Le rêve éveillé	6
Logique aristotélicienne	La méthode (R. Descartes)	15

Plusieurs de ces logiques peuvent être intéressantes dans le cadre de l'anticipation, nous présentons ultérieurement l'exploitation de ces logiques dans le cadre de ce travail.

#### 4.1.4 La méthode TRIZ

TRIZ est une méthode qui oriente le concepteur dans une direction restreinte de prospective, puis le guide par un processus systématique d'aide. Elle permet au concepteur d'aborder le problème, en s'appuyant à chaque étape de sa résolution sur des outils. Ces outils le dirigent vers des solutions génériques que d'autres ont suivies dans des configurations de problèmes similaires (voir figure 4.1).

**Figure 4.1 : Résoudre un problème par TRIZ [Cavallucci, 1998].**

Lors de la mise en pratique de TRIZ, Altshuller estime que certaines notions sont essentielles à tout problème de recherche d'idées. Il est proposé dans TRIZ de les considérer comme des « fils rouges » de la réflexion [Cavallucci, 1998]. Ces notions sont les suivantes.

- **La contradiction** : selon Altshuller, pour être résolu, tout problème doit être reformulé de manière à apparaître sous la forme de contradiction. Il identifie trois types de contradictions : organisationnelle, technique ou physique.
- **L'inertie psychologique** : cette notion est présentée dans le paragraphe suivant car elle est jugée intéressante pour notre problématique et qu'elle a été utilisée dans le développement de la démarche.
- **Le résultat idéal final** : Altshuller recommande de suivre les recommandations d'aide à la définition de l'idéal. En effet, il considère que tout système peut être défini en terme d'idéal. Suivre cette idéalité revient à minimiser les fonctions coût et les fonctions nuisibles d'un système tout en maximisant les fonctions utiles de ce même système.

- **La loi d'évolution** : Tout système technique évolue, à la manière d'un système biologique, en suivant un certain nombre de lois essentielles auxquelles il ne peut déroger. Huit lois d'évolution formalisées sont données dans TRIZ.

### 4.1.5 La notion d'inertie psychologique

La notion d'inertie psychologique constitue, selon Altshuller, le frein essentiel de la créativité. L'inertie psychologique peut être déclenchée par :

- les habitudes,
- les compétences trop pointues dans un domaine particulier,
- les inerties générées par le jargon du spécialiste.

Altshuller préconise plusieurs solutions pour vaincre l'inertie psychologique :

- favoriser la pluridisciplinarité,
- respecter toutes les idées, même les plus farfelues,
- identifier les termes porteurs d'inertie psychologique et les remplacer par d'autres plus neutres.

La méthode TRIZ présente un ensemble d'outils de déblocage de l'inertie psychologique : la vision à neuf écrans, la méthode des hommes miniatures et les opérateurs DTC (Dimension, Temps et Coût). On consultera la référence [Cavallucci, 1998] pour de plus amples informations sur ces outils.

## 4.2 Construction de la méthode STIMEX-IMDP

Il s'agit dans cette première étape du processus d'anticipation (voir paragraphe 2.4.2, Etape 1, figures 2.4 et 2.7), d'identifier tous les mécanismes de dégradation qui pourraient être à l'origine de défaillances potentielles jusqu'à la fin d'exploitation du matériel, et particulièrement pendant la période de prolongation non prévue à la conception. Nous proposons pour cela une méthode structurée appelée STIMEX-IMDP, pour **STIM**ulation d'**EX**perts pour l'**Id**entification des **Mé**canismes de **Dé**gradation **P**otentiels.

Pour structurer cette méthode nous nous sommes basés sur trois notions relatives à l'aide à la créativité qui nous sont parues intéressantes pour l'anticipation : la logique associative, qui nous a amené à identifier les informations pertinentes pour aider les experts à identifier les mécanismes de dégradation potentiels, la logique analogique, qui nous a inspiré l'utilisation du retour d'expérience analogue et la notion d'inertie psychologique pour laquelle nous proposons plusieurs solutions.

### 4.2.1 L'identification des informations nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode

Comme vu précédemment dans les chapitres 2 (voir paragraphe 2.4.2, Etape 1) et 3 (voir paragraphe 3.4.1.4, Etape 1 et tableau 3.5), cette méthode intervient lors d'une réunion collective. Au début de la réunion, il faut présenter aux participants le contexte et les objectifs de l'étude et particulièrement les objectifs de la réunion. Ensuite, il faut mettre à la disposition des experts l'ensemble des informations existantes collectées par l'analyse.

Ces informations sont réunies dans le document 2 issu de la deuxième phase de la démarche AVISE (voir paragraphe 2.4.2, Phase 2).

Parmi ces informations, un certain nombre peut être exposé aux experts, afin de préciser le cadre de l'étude, de mieux stimuler les experts et d'aider les experts en matériaux à mieux connaître le matériel et son fonctionnement :

- le périmètre de l'étude (présentation des schémas techniques),
- les fonctions,
- les différentes évolutions de conception et d'exploitation,
- les mécanismes potentiels identifiés lors de précédentes études de fiabilité : ce sont les mécanismes prévus,
- le retour d'expérience de l'entreprise et le retour d'expérience extérieur : ce sont les mécanismes avérés.

Il s'agit ensuite d'élargir au maximum le spectre de recherche des mécanismes pour retenir finalement les mécanismes potentiels pour le matériel, c'est à dire ceux qui peuvent l'affecter compte tenu des matériaux qui le constituent, des conditions de service (d'exploitation et de maintenance) et environnementales dans lesquelles il évolue.

Une première idée est donc de partir des mécanismes potentiels identifiés lors des études précédentes de fiabilité (mécanismes prévus à la conception le plus souvent, ou en cours d'exploitation), et des mécanismes effectivement avérés du matériel. On élargit ensuite cet ensemble de mécanismes avérés et de mécanismes prévus en tenant compte de toutes les modifications qui ont affecté le matériel : une modification des conditions d'exploitation ou de maintenance, ou encore une modification de la durée d'exploitation initialement prévue. A la suite de discussions entre les experts, on réduit finalement cet ensemble afin d'aboutir à la liste des mécanismes potentiels du matériel étudié (voir figure 4.2).

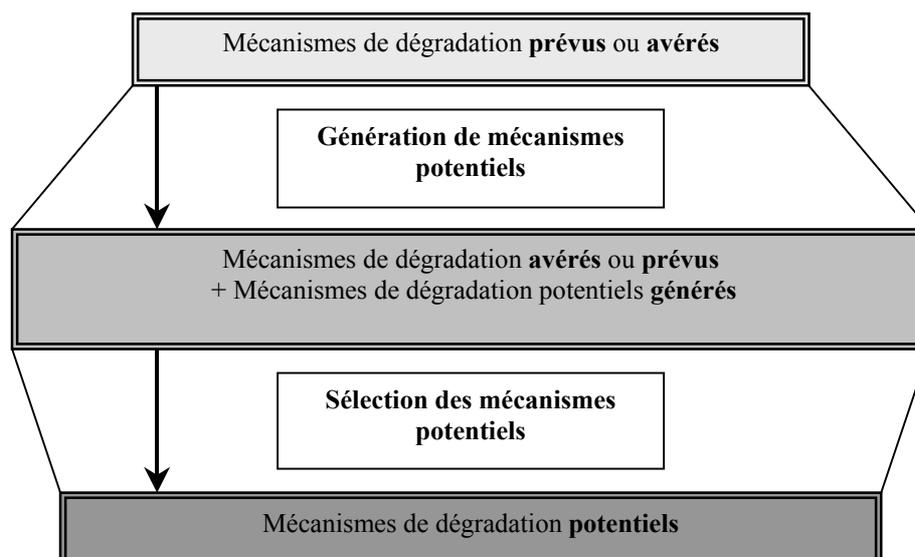


Figure 4.2 : Génération et sélection par les experts des mécanismes de dégradation potentiels.

Le risque que présente cependant ce genre d'approche, est de passer à côté de mécanismes potentiels lors de la génération des mécanismes possibles. Pour remédier à ce risque, nous proposons de partir d'une liste globale de mécanismes, indépendante du matériel étudié, que nous considérons comme liste de référence. A partir de cette liste de référence, les experts sélectionnent par la suite les mécanismes potentiels du matériel, compte tenu des matériaux et des conditions d'exploitation. Un premier travail dans la construction de cette méthode de stimulation d'experts, consiste donc à élaborer une liste de référence de mécanismes de dégradation.

## 4.2.2 Les listes de référence de mécanismes de dégradation et de modes ou effets du vieillissement

Quatre listes sur les mécanismes de dégradation et sur les modes ou effets du vieillissement ont été répertoriées :

- la liste dite EDF [Boudot, 2003] : il s'agit d'une liste de mécanismes de dégradation et de modes de ruine (voir annexe 6).
- la liste EDF - OMF [Saby, 1997] : la méthode OMF (Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité) découpe l'installation suivant quatre niveaux : les groupes fonctionnels GF, les ensembles technologiques ET, les sous-ensembles technologiques SET et finalement les composants. Pour les groupes fonctionnels et les ensembles technologiques, une liste de modes de défaillances est précisée. Pour les composants élémentaires, une liste d'effets mesurables est proposée. Dans le cadre de notre analyse qui porte sur le vieillissement, c'est la liste des mécanismes et modes ou effet du vieillissement sur les composants passifs (tuyauterie) qui a été retenue.
- la liste EPRI [Carey, 2001] : la liste EPRI est présentée sous la forme d'un tableau dont la structure est donnée ci-dessous (voir tableau 4.2). Cette liste est donnée en annexe 7.

**Tableau 4.2 : Structure de la liste EPRI de mécanismes de dégradation [Carey, 2001].**

Matériau	Mécanisme de dégradation	Critères d'apparition du mécanisme	Effets du vieillissement

- la liste ISO/CD 14224 [ISO/CD 14224, 2003], norme en projet sur le retour d'expérience technique : cette liste regroupe un ensemble de mécanismes de dégradation et de modes de défaillances classés par type de défaillance : défaillance mécanique, défaillance du matériau, influence externe, défaillance des instruments de mesure et de contrôle, et finalement défaillance électrique (voir annexe 8).

Une liste la plus exhaustive possible a été constituée par réunion de ces quatre listes, après les avoir consolidées. Elle se divise en deux parties : une liste de 40 mécanismes de dégradation et une liste de 21 modes ou effets du vieillissement. Ces listes de référence sont présentées dans les tableaux 4.3 et 4.4 ci-dessous.

Afin de faire évoluer éventuellement ces listes pour qu'elles deviennent de plus en plus exhaustives, il convient de demander aux experts, à chaque application de la méthode, de les compléter par les mécanismes et les modes ou effets du vieillissement qu'ils jugent potentiels pour le matériel étudié et qui n'y figureraient pas.

**Tableau 4.3 : Liste de référence des mécanismes de dégradation.**

Mécanismes de dégradation		
	14. Corrosion sous une ligne d'eau	28. Fluage d'irradiation
1. Alkali-réaction	15. Corrosion de tuyauteries à âme acier	29. Fragilisation sous irradiation
2. Corrosion générale	16. Erosion	30. Fragilisation sous hydrogène
3. Corrosion galvanique	17. Erosion par cavitation	31. Gonflement
4. Corrosion atmosphérique	18. Erosion par impact de gouttes	32. Hydrolyse
5. Corrosion caverneuse (en zones confinées)	19. Abrasion	33. Matage
6. Corrosion due à des fuites (exemple fuite d'acide borique concentré)	20. Fatigue mécanique	34. Relaxation de la précontrainte
7. Corrosion due à une interface liquide vapeur	21. Fatigue-endurance	35. Retrait
8. Corrosion érosion	22. Fatigue-corrosion	36. Fretting
9. Corrosion inter-cristalline (inter granulaire)	23. Fatigue thermique	37. Tassement
10. Corrosion par frottement	24. Fatigue thermique à grand nombre de cycles	38. Usure
11. Corrosion par piqûres	25. Stratification thermique	39. Vieillessement (des élastomères, des polymères, du néoprène)
12. Corrosion sous contrainte	26. Fatigue vibratoire	40. Vieillessement thermique
13. Corrosion sous hydrogène	27. Filtrage sélectif (« selective leaching »)	

Nous regroupons par des couleurs différentes les mécanismes de corrosion, d'érosion, de fatigue et de vieillissement.

**Tableau 4.4 : Liste de référence des modes de ruine ou effets du vieillissement.**

Modes de ruine ou effets du vieillissement	
	11. Faïençage
1. Arrachement	12. Fissuration
2. Bouchage	13. Flambage
3. Déchirure ductile	14. Fuite
4. Déformation excessive	15. Grippage
5. Désolidarisation	16. Instabilité plastique
6. Desserrage	17. Percement
7. Echauffement	18. Perte de matériau (perte d'épaisseur)
8. Encrassement	19. Perte des caractéristiques des joints
9. Inflammation	20. Réduction de la résistance à la rupture
10. Explosion/implosion	21. Rupture brutale

### 4.2.3 Le retour d'expérience analogue

En s'inspirant du principe de la logique analogique de Jaoui, un autre type d'information peut s'avérer très utile dans le cadre de l'anticipation des défaillances potentielles d'un matériel. Il s'agit de l'historique des défaillances de matériels différents du matériel étudié, mais qui sont faits dans le même matériau, avec des procédures de conception ou de fabrication sensiblement voisines, qui évoluent dans un même environnement d'exploitation ou de maintenance. Nous appelons ces matériels : matériels analogues.

Dans le cadre de l'anticipation de défaillances dues au vieillissement, l'élément d'analogie le plus important semble être le matériau, puis les conditions de service. En effet, c'est le matériau qui subit les mécanismes de dégradation sous l'effet de conditions de service ou d'utilisation. Comme deux matériels analogues peuvent subir

le même mécanisme conduisant à la même défaillance, il est alors intéressant d'identifier de(s) matériel(s) analogue(s) au matériel étudié et de considérer leur retour d'expérience.

Ces matériels peuvent présenter des défaillances avérées dues à des mécanismes de dégradation qui n'ont pas été identifiées pour le matériel étudié. Il s'agit dans ce cas de vérifier si les conditions d'apparition de ces mécanismes ne peuvent pas se reproduire dans le cas d'étude considéré. Nous précisons dans ce qui suit, le moment le plus pertinent, dans la structure de la méthode, pour présenter ce retour d'expérience analogue aux experts.

#### **4.2.4 La structuration de la sélection des mécanismes potentiels**

Nous avons proposé une liste de référence de mécanismes à partir de laquelle les experts peuvent sélectionner ceux potentiels pour le matériel étudié. Lors de la sélection, il est important d'aider les experts à vaincre l'inertie psychologique (voir paragraphe 4.1.5 ci-dessus) pour leur permettre de sélectionner tous les mécanismes de dégradation potentiels, sans être conditionnés par leur domaine de compétence et particulièrement par les mécanismes potentiels déjà identifiés et connus des experts, qu'ils soient prévus ou avérés.

Pour cela, Althshuller a proposé trois solutions que nous pouvons adapter à notre problématique d'anticipation.

##### **Favoriser la pluridisciplinarité**

Cet aspect a déjà été abordé dans les chapitres 2 (voir paragraphe 2.4.2, Etape 1) et 3 (voir paragraphe 3.4.1.2, Etape 1 et tableau 3.5). La participation des experts suivants a donc été préconisée :

- des experts en matériaux qui composent le matériel étudié,
- des experts « cycle de vie » du matériel : l'expert de conception, l'expert d'ingénierie, l'expert d'exploitation et l'expert de maintenance.

##### **Respecter toutes les idées**

Afin de garantir le respect de toutes les idées, il est possible de s'inspirer de la méthode dite « brainstorming », identifiée par Vadcard comme étant l'outil père de la logique associative. En effet, cette méthode préconise l'utilisation de « post-it » qui rendent les idées impersonnelles et qui permettent ainsi aux experts de s'exprimer sans la peur d'être jugés et évalués par les autres.

Un aspect caractérisant les réunions collectives (présenté dans le chapitre 3), peut constituer un frein important au respect de toutes les idées : les rapports de force entre experts qui peuvent exister dans ce type de réunions. En effet, un « leader » peut monopoliser l'opinion du groupe. D'autre part, des experts timides hésitent à exprimer leur avis.

Pour éviter ces rapports de force et permettre ainsi l'émergence d'un plus grand nombre d'idées, nous proposons aux experts, dans un premier temps, d'exprimer leur opinion sur des « post-it », de manière individuelle. Les réponses sont alors présentées à l'ensemble des participants, tout en restant complètement impersonnelles.

### Sortir les experts de leurs habitudes : préoccupations et jargons spécifiques à chaque domaine d'expertise

Pour mettre en œuvre ce concept, nous proposons aux experts de suivre une sélection successive, suivant une logique imposée qui n'est pas la leur (voir la figure 4.3).

- **Filtre 1** : Lors de ce premier filtre, les experts doivent éliminer de la liste de référence (voir tableau 4.3) tous les mécanismes qui, de leur point de vue, sont complètement aberrants pour le matériel étudié, et ceci sans fournir de justification.

Cette sélection est faite de manière individuelle, les résultats de tous les experts sont ensuite affichés en tenant compte de tous les mécanismes sélectionnés. Par exemple, même si un mécanisme est sélectionné par un seul expert, il est néanmoins affiché. Une discussion permet par la suite d'aboutir à une sélection approuvée par tous. Cette démarche est suivie de la même manière pour les deux filtres suivants (filtres 2 et 3).

- **Filtre 2** : il s'agit ensuite d'éliminer de la liste issue du filtre 1, les mécanismes qui ne peuvent en aucun cas affecter le matériel en tenant compte des matériaux qui le composent. Les mécanismes non éliminés constituent la liste des mécanismes pouvant affecter le matériau, c'est-à-dire le matériel étudié.

Pour faciliter ce travail, il est alors nécessaire de préciser aux experts l'ensemble des matériaux qui composent le matériel, ainsi que leurs caractéristiques mécaniques et leur composition chimique. Afin de stimuler les experts lors de cette étape, nous proposons de présenter aussi le retour d'expérience analogue du matériel (voir paragraphe 4.2.3).

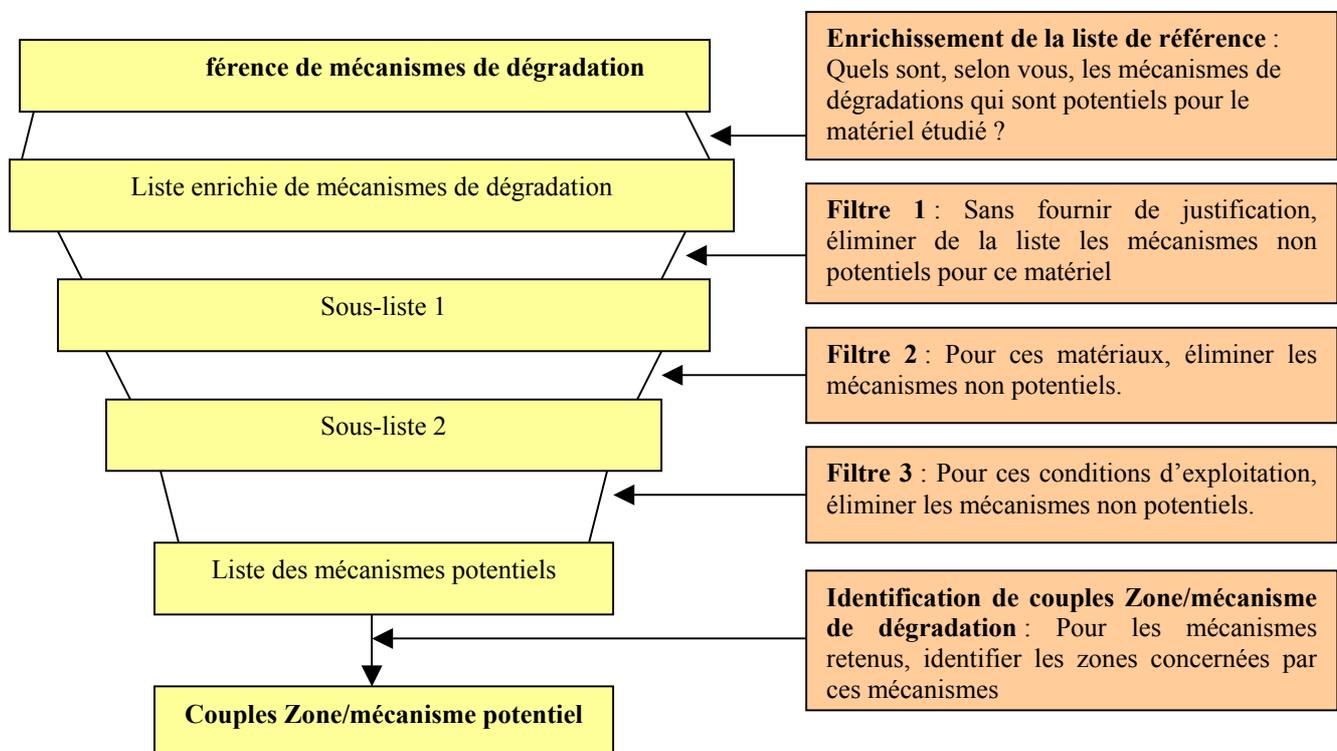


Figure 4.3 : Filtres successifs pour l'identification de couples Zone/mécanisme potentiels.

- **Filtre 3** : Les mécanismes de dégradation apparaissent ou non, en fonction des conditions d'exploitation et de l'environnement dans lequel évolue le matériel. Nous demandons donc aux experts, dans ce filtre, d'éliminer de la liste précédente les mécanismes de dégradation qui ne peuvent pas apparaître dans les conditions spécifiques au matériel étudié.

Avant de demander aux experts d'appliquer ce filtre, il faut leur communiquer les conditions d'exploitation et les caractéristiques des milieux interne et externe dans lesquels évolue le matériel : température, pression, débit, concentrations chimiques, ... Ces conditions connues sont généralement les conditions de fonctionnement normal, mais bien souvent, ce sont les écarts par rapport à ces conditions de fonctionnement normal qui provoquent l'apparition d'un mécanisme. Il est donc important de recueillir et de présenter aux experts le retour d'expérience des écarts constatés réellement, et celui des erreurs humaines qui peuvent placer le matériel dans des conditions particulières d'apparition d'un mécanisme.

Lors de l'application de ces filtres successifs, nous avons fait le choix de demander aux experts de supprimer les mécanismes qui ne sont pas potentiels au lieu de sélectionner ceux qui le sont. En effet, cette deuxième possibilité peut amener les experts à sélectionner les mécanismes prévus qu'ils connaissent déjà, sans réfléchir à de nouveaux mécanismes potentiels. La suppression, au contraire, les oblige à parcourir l'ensemble de la liste de référence, et à passer en revue tous les mécanismes proposés.

#### - Identification de couples Zone/mécanisme de dégradation

Nous obtenons, après application des trois filtres précédents, une liste de mécanismes de dégradation potentiels pour le matériel. Cependant, les paramètres de fonctionnement (comme par exemple la température, la pression) peuvent différer selon les différentes zones ou les différents composants du matériel (il peut y avoir par exemple des zones de mélange de fluides, des interfaces liquide-vapeur, ...). Nous devons donc affecter les mécanismes sélectionnés lors des filtres successifs aux différentes zones ou composants du matériel. Cette affectation est réalisée lors d'une discussion guidée par l'animateur avec l'ensemble des experts.

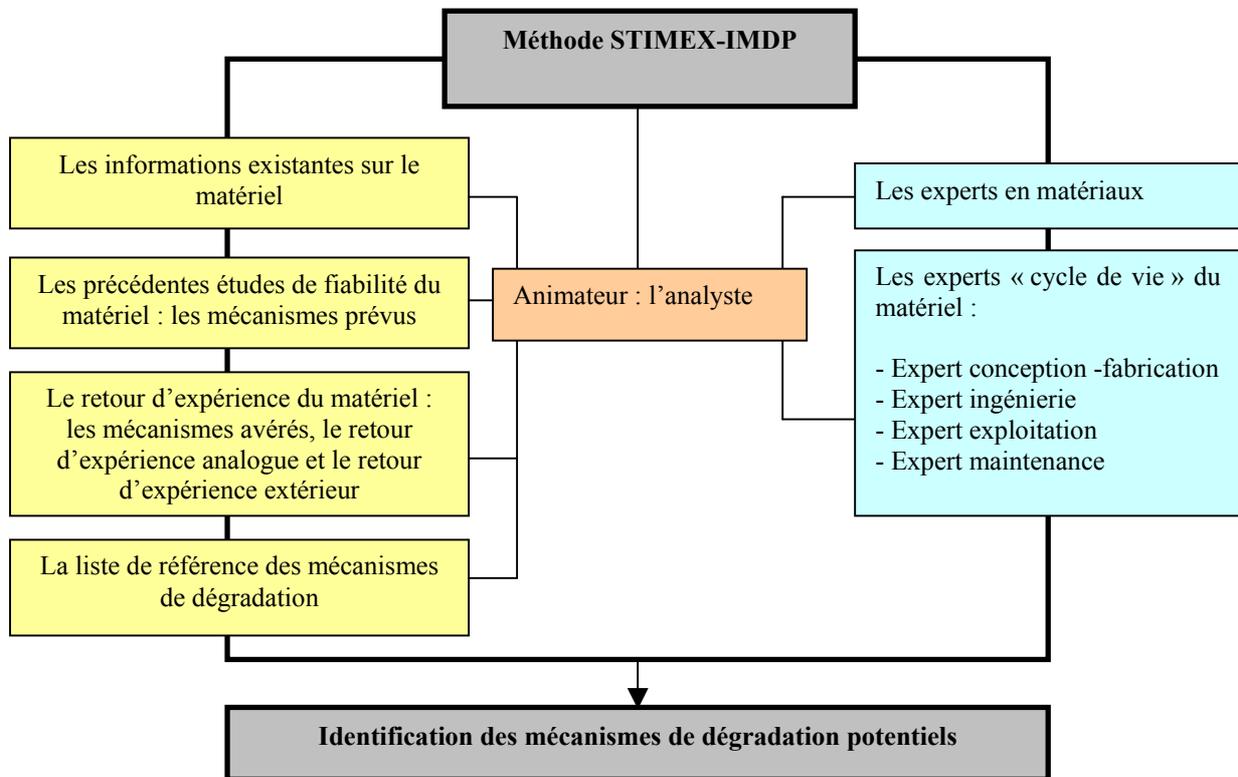
**Tableau 4.5 : Les différentes informations présentées lors des filtres successifs.**

Réunion collective	Informations présentées
Filtre 1	- la liste de référence de mécanismes de dégradation
Filtre 2	- les matériaux - le retour d'expérience analogue
Filtre 3	- les conditions d'exploitation - les spécifications des milieux interne et externe - le retour d'expérience des écarts constatés - le retour d'expérience des erreurs humaines
Identification de couples Zone/Mécanisme de dégradation	- le découpage structurel du matériel : les différentes zones et leurs caractéristiques - les schémas techniques

Avant de demander aux experts de faire cette affectation, il convient de leur présenter, les différentes zones du matériel et les caractéristiques de ces zones. Si la zone en question est une soudure, par exemple, il est

intéressant de présenter la qualité de fabrication de cette soudure ; en effet, les défauts de fabrication (qui sont des défauts existants) peuvent favoriser l'apparition de certains mécanismes et la propagation de défauts. Le tableau 4.5 résume l'ensemble des filtres et des informations présentées lors de la réunion collective.

#### 4.2.5 La synthèse des résultats



**Figure 4.4 : Méthode STIMEX-IMDP, stimulation d'experts pour l'identification des mécanismes de dégradation potentiels.**

Dans la première partie de ce chapitre 4, nous avons identifié une classification des méthodes de créativité selon leur logique de mise en œuvre. Deux de ces logiques nous ont guidés dans la structuration de la méthode de stimulation d'experts pour l'identification des mécanismes de dégradation potentiels :

- la logique associative : utilisation de l'ensemble des informations concernant le matériel et sur une équipe d'experts pluridisciplinaires,
- la logique analogique : stimulation des experts grâce au retour d'expérience de matériels analogues,

D'autre part, en s'inspirant des solutions proposées par Altshuller pour vaincre l'inertie psychologique, considérée comme le principal frein à la créativité, une analyse basée sur une méthode structurée a été développée. Partant d'une liste de référence de mécanismes de dégradation, réalisée dans le cadre de ce travail, une suite de filtres successifs permet d'aboutir au résultat attendu. A chaque filtre, un certain nombre d'informations sont présentées aux experts afin de les stimuler. La figure 4.4 rappelle les différents acteurs de cette méthode, auxquels l'analyste a recours, ainsi que les différentes informations utilisées.

## 4.3 Construction de la méthode STIMEX-IPP

Cette méthode doit permettre aux experts de trouver des solutions et des parades aux mécanismes de dégradation potentiels identifiés et jugés critiques, c'est-à-dire pertinents pendant la période d'exploitation prévue et pouvant avoir des conséquences graves. Elle intervient dans l'étape 4 du processus d'anticipation (voir figure 2.7). Nous l'avons appelé STIMEX-IPP pour **STIM**ulation d'**EX**perts pour l'**Id**entification des **Parades Pot**entielles.

Comme précédemment cité dans les chapitres 2 (voir paragraphe 2.4.2, Etape 4) et 3 (voir tableau 3.5), cette étape du processus d'anticipation peut être réalisée dans le cadre d'une réunion collective regroupant des experts pluridisciplinaires : les experts « cycle de vie » du matériel et particulièrement les experts en maintenance.

### 4.3.1 La structuration de la méthode

Les couples critiques Zone/Mécanisme sont analysés un à un. Un premier point de cette analyse consiste à identifier les effets possibles du vieillissement dus au mécanisme de dégradation étudié :

**l'identification des conséquences** : il faut déterminer les conséquences que peut entraîner le mécanisme sur le matériel, puis sur l'installation. Une fuite, par exemple, peut mettre en danger la vie des intervenants et entraîner l'arrêt de l'installation pendant un certain temps, ce qui porte atteinte à la sécurité, cause une perte de production et des coûts de maintenance. Il s'agit aussi d'identifier un éventuel enchaînement de causes [Boudot, 2003] : une fuite, par exemple, peut entraîner une explosion en mettant en contact des produits dangereux.

**l'apparition d'éventuels nouveaux mécanismes** : il s'agit ici de s'interroger sur d'éventuels couplages entre mécanismes. L'apparition d'un mécanisme peut en effet favoriser celle d'un autre.

Il faut ensuite évaluer l'efficacité de la maintenance préventive (cas des matériels actifs) ou des inspections existantes (cas des matériels passifs) par rapport au couple étudié. Si cette maintenance n'est pas efficace, il est alors demandé aux experts de proposer de nouvelles solutions pour l'améliorer. Ceci suppose la présentation aux experts des procédures de maintenance préventive existantes, et particulièrement les inspections actuelles du matériel.

Nous pouvons aborder alors, le principal objectif de cette seconde réunion de stimulation : identifier des éventuelles améliorations permettant d'éviter ou de ralentir l'apparition des mécanismes critiques identifiés. Nous proposons pour cela une méthode structurée selon les différents types de solutions données dans le chapitre 2 (voir paragraphe 2.4.2, Etape 4). Ces solutions sont classées dans l'ordre croissant des investissements nécessaires pour leur mise en œuvre :

- **le changement des paramètres d'exploitation** : changer la fréquence des sollicitations ou encore diminuer les températures de fonctionnement peuvent être des solutions suffisantes pour éviter ou retarder l'apparition du mécanisme pendant la période d'exploitation prévue.

- **le changement / la restauration des caractéristiques des matériaux** : comme les mécanismes agissent sur les matériaux, il est parfois possible de changer ou de restaurer les caractéristiques du matériau sensible pour éviter l'apparition du mécanisme. A titre d'exemple, le recuit de certains matériaux (exposition à une température élevée) permet de retarder l'apparition du vieillissement thermique. Encore faut-il que cette solution soit réalisable techniquement (déplacer le composant pour pouvoir réaliser le recuit).
- **le remplacement** : une solution radicale et souvent coûteuse consiste à remplacer le matériel. Si cette solution est retenue, une étude de faisabilité technico-économique est nécessaire. Ceci permet d'évaluer les efforts à mettre en œuvre du point de vue technique, les délais éventuels du remplacement et la rentabilité de l'investissement. En effet, si l'investissement est trop élevé, il est peut être plus intéressant d'arrêter définitivement l'installation. Il s'agit alors de déterminer l'horizon d'exploitation sûre de l'installation.
- **la re-conception** : cette solution consiste à remplacer le matériel tout en l'améliorant. Si un matériau s'avère inapproprié, il peut être envisagé de le remplacer par un matériau plus résistant. Une telle solution peut être intéressante pour améliorer les performances d'une installation.

Si une re-conception est nécessaire, nous conseillons l'utilisation de la méthode TRIZ pour trouver de nouvelles solutions technologiques. En effet, cette méthode se démarque par rapport aux autres méthodes d'aide à la créativité [Cavallucci, 1998]. Les méthodes classiques mettent tout en œuvre pour déclencher l'idée en plaçant toute la capacité de produire les idées sur les compétences créatrices de l'homme. TRIZ permet de donner des solutions génériques qui dirigent la recherche d'idées dans la bonne direction (voir figure 4.1). Cette méthode est utilisée en conception dans l'industrie automobile.

Les différentes solutions sont proposées au cours d'une discussion guidée par un animateur. Afin de stimuler la créativité des experts, l'animateur peut leur proposer trois types d'informations :

- **des méthodes génériques d'inspection et d'évaluation du vieillissement**

Une liste de méthodes d'inspection et d'évaluation du vieillissement est donnée par [CEC, 2000]. Cette liste propose, à titre d'exemple, cinq méthodes d'évaluation du vieillissement thermique (voir tableau 4.6). Les méthodes génériques proposées sont de différentes natures :

- les méthodes de surveillance permettent la détection en exploitation d'une défaillance, comme la détection de fuite par exemple.
- les méthodes d'inspection et d'évaluation du vieillissement sur l'installation consistent à évaluer l'état du matériel pendant un arrêt de l'exploitation, par un contrôle non destructif, comme les courants de Foucault ou par l'analyse d'échantillons témoins de fatigue.
- les méthodes d'analyse du vieillissement en laboratoire sont par exemple des tests sur des échantillons, ou encore des simulations en laboratoire dans des conditions représentatives.

**Tableau 4.6 : Méthodes génériques d'évaluation du vieillissement [CEC, 2000].**

Mécanisme de vieillissement	Méthode d'évaluation et d'inspection
Fragilisation par irradiation	- Tests mécaniques d'échantillons (selon un programme prédéterminé) - Essais de dureté - Annihilation des positrons
Vieillessement thermique	- Tests mécaniques d'échantillons pris sur des composants en service ou expertise de composants remplacés - Tests de dureté - Diffraction neutronique - Effet Seebeck - Simulation en laboratoire dans des conditions représentatives
Phase d'initiation de la fatigue	- Mesure des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X - Courants de Foucault - Effet Barkhausen - Thermographie infrarouge - Echantillons témoins de fatigue
Détection de fissures de fatigue ou corrosion (inter granulaire, sous contrainte)	- Examens non destructifs : examens de surface (visuel, télévisuel, magnétique, ressuage) ; examens volumétriques (courants de Foucault, radiographie, gammagraphie, ultrasons) - Emission acoustique - Détection de fuite
Corrosion locale et uniforme, usure	- Mesures d'épaisseur par examens ultrasoniques
Perte de précontrainte	- Mesures de déformation et de contrainte par jauges extenso métriques et dynamomètres

Toutes ces méthodes, même si elles ne sont pas toujours applicables directement sur l'installation, pourraient donner aux experts des idées de parades potentielles.

**- des méthodes préventives pour contrer le vieillissement**

Des exemples concernant les tuyauteries sont également donnés par [CEC, 2000]. Dans ces exemples, nous trouvons trois méthodes pour éviter la fatigue : une méthode de changement des paramètres d'exploitation (la réduction des gradients de température), et deux solutions de re-conception (re-conception pour éviter la stratification thermique et re-conception du supportage pour minimiser les vibrations et les contraintes mécaniques d'encastrement) (voir tableau 4.7).

**- un retour d'expérience analogue et extérieur**

Comme pour l'identification des mécanismes potentiels, le retour d'expérience du matériel dans des installations extérieures à l'entreprise et le retour d'expérience de matériels analogues peuvent donner des pistes de solutions qui pourraient être adaptées au cas étudié.

**Tableau 4.7 : Exemples de méthodes préventives pour contrer le vieillissement [CEC, 2000].**

Note : ces exemples concernent les tuyauteries

Mécanisme de dégradation	Type de méthodes	Méthodes
Corrosion inter granulaire	Changement ou restauration des caractéristiques du matériau	- Revêtement résistant à la corrosion - Traitement thermique pour retenir le carbone - Soudure à froid pour la réparation ou le remplacement d'une section - Amélioration des soudures par application d'un nouveau joint - Amélioration de la contrainte par chauffage par induction

		- Amélioration des contraintes mécaniques par compression d'un vérin hydraulique
Corrosion inter granulaire	Changement des paramètres d'exploitation	- Chimie de l'eau par injection d'hydrogène
Vieillessement thermique	Changement ou restauration des caractéristiques du matériau	- Annihilation
Fatigue	Changement des paramètres d'exploitation	Réduction des gradients de température Reconception pour éviter la stratification thermique Reconception du supportage pour minimiser les vibrations
Erosion, corrosion	Changement des paramètres d'exploitation	Ajustement de la chimie de l'eau
Erosion, corrosion	Changement ou restauration des caractéristiques du matériau	Utilisation d'un revêtement plus résistant ou amélioration de la composition chimique du matériau
Erosion, corrosion	Reconception	Reconception pour éviter les zones de forte turbulence.

### 4.3.2 La synthèse des résultats

La structuration de cette méthode est basée principalement sur une typologie des parades potentielles. Cette typologie constitue en effet le fil conducteur de la réunion et impose ainsi aux experts une méthode de réflexion structurée qui les oblige à considérer différents types de solutions possibles. Pour stimuler la créativité des experts dans cette étape de recherche de solutions potentielles, nous proposons de mettre à leur disposition un certain nombre d'informations : des solutions génériques d'évaluation et de prévention du vieillissement et les retours d'expérience analogue et extérieur (voir figure 4.5). Ces solutions constituent une liste de référence de solutions, un peu comme la liste de référence des mécanismes de dégradation.

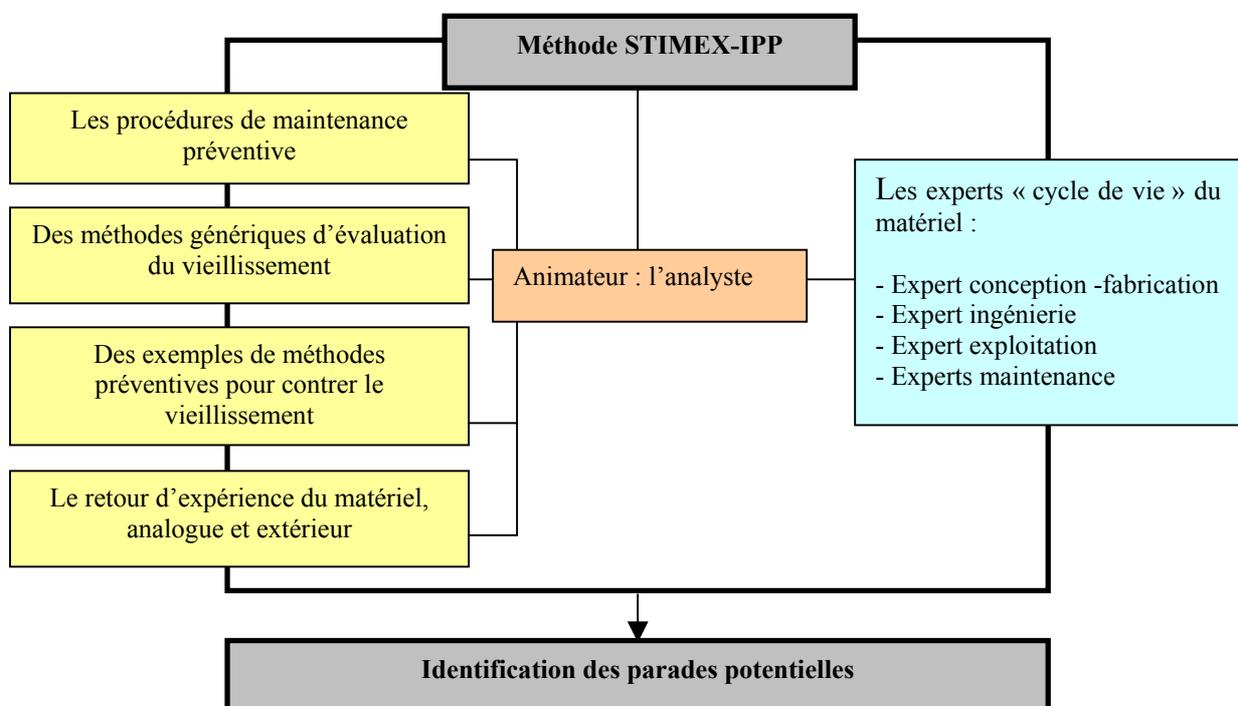


Figure 4.5 : Méthode STIMEX-IPP, stimulation d'experts pour l'identification de parades potentielles.

## Conclusion

Dans ce chapitre, deux méthodes de stimulation d'experts ont été construites : STIMEX-IMDP en support à l'étape 1 et STIMEX-IPP en support à l'étape 4 du processus d'anticipation. Ces méthodes s'inspirent des outils et des concepts de base de l'aide à la créativité. Elles ont été structurées de manière à guider les experts dans leur réflexion tout en mettant à leur disposition des informations qui peuvent stimuler leur créativité.

Les informations collectées dans la phase 2 de la démarche globale d'anticipation constituent une donnée d'entrée essentielle pour ces méthodes. De plus, deux listes de référence de mécanismes de dégradation et de modes ou effets du vieillissement ont été élaborées pour servir de support de base à la méthode STIMEX-IMDP. En partant de ces listes, les experts viennent appliquer des sélections successives selon une logique bien définie.

Pour la méthode STIMEX-IPP, deux listes de solutions génériques peuvent être proposées aux experts : une liste de méthodes génériques d'évaluation du vieillissement et une liste de méthodes préventives pour contrer le vieillissement.



# Chapitre 5

---

## Modélisation et quantification dans la démarche d'anticipation par l'utilisation des réseaux bayésiens

---

Dans ce chapitre, nous présentons l'utilisation des réseaux bayésiens dans la démarche d'anticipation du vieillissement. Le besoin d'utiliser ce genre d'outil ayant été mis en évidence dans le chapitre 2 (voir paragraphe 2.4.2), nous proposons dans ce chapitre de montrer comment cet outil peut être mis en œuvre dans la démarche.

Dans un premier paragraphe, les concepts de base de cet outil sont définis. Nous présentons par la suite les différentes situations pour lesquelles nous pouvons utiliser un réseau bayésien, ainsi que les différents domaines d'application de cet outil. La procédure de construction d'un réseau bayésien est finalement donnée. Pour le lecteur familier avec cet outil, nous conseillons de passer directement à la partie suivante (paragraphe 5.2).

Nous présentons dans une deuxième partie l'application des réseaux bayésiens dans les étapes 2 et 3 du processus d'anticipation :

- étape 2, évaluation de la pertinence d'un mécanisme de dégradation à un horizon d'exploitation  $t$  : la construction d'un réseau bayésien pour l'évaluation de la pertinence de la fatigue thermique sur un matériel donné à un horizon  $t$  d'exploitation est présentée à titre d'exemple.
- étape 3, analyse et hiérarchisation des mécanismes pertinents : la construction d'un réseau bayésien pour l'évaluation de l'impact d'un mécanisme de dégradation sur le vieillissement d'un matériel, à un horizon  $t$ , est également proposée pour illustration.

Afin de valider ce choix et de montrer l'intérêt de cet outil, une application numérique relative à un matériel donné a été réalisée.

## 5.1 Présentation des réseaux bayésiens

Un réseau bayésien est un modèle graphique qui marie la théorie des graphes et la théorie des probabilités. Les modèles graphiques ont fait l'objet de nombreuses études et sont présents dans de nombreux articles lors de ces dernières années. On peut citer par exemple Lauritzen et Spiegelhalter [Lauritzen, Spiegelhalter, 1988], [Whittaker, 1990], Lauritzen [Lauritzen, 1996], Jordan [Jordan, 1999], et dans le cadre de la sûreté de fonctionnement et plus particulièrement de la maintenance Yilzid et Golay [Yilzid, Golay, 2001] et Chatelain et Lannoy [Chatelain, Lannoy, 2002]. Dans cette partie, nous présentons les concepts de base liés à cet outil pour mieux comprendre son utilisation par la suite dans le cadre de l'anticipation.

### 5.1.1 Les concepts de base

Le réseau bayésien est défini selon Jensen [Jensen, 1990] comme étant un graphe orienté acyclique dont :

- les nœuds représentent les variables aléatoires du modèle,
- les arcs définissent l'existence de relations entre ces variables.

Le réseau bayésien est défini par un ensemble de variables et un ensemble d'arcs orientés entre les variables.

Chaque variable possède un nombre fini d'états (ou de modalités). La réunion des variables et des arcs forme un graphe orienté acyclique (c'est-à-dire qu'il ne peut pas y avoir de cycles reliant les variables).

#### Exemple

Le réseau compte 5 variables  $X_i$  (avec  $i=1, \dots, 5$ ),

$X_1$  est la variable d'entrée,

$X_2$ ,  $X_3$  et  $X_4$  sont les 3 variables intermédiaires,

et  $X_5$  est la variable de sortie (voir figure 5.1).

Chaque variable a 2 états  $EX_{i1}$  et  $EX_{i2}$

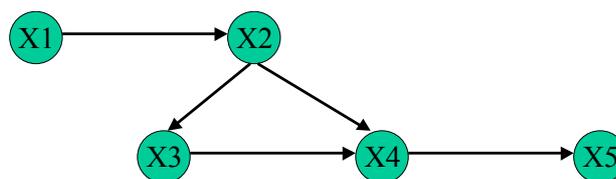


Figure 5.1 : Exemple de réseau bayésien.

### 5.1.2 Les probabilités

#### 5.1.2.1 Les probabilités a priori

Pour les variables d'entrée du modèle, on associe des probabilités a priori. Ces probabilités sont renseignées :

- soit par avis d'experts,
- soit à l'aide du retour d'expérience.

Dans le cas de l'exemple précédent, les probabilités d'entrée sont données par le tableau 5.1.

**Tableau 5.1 : Variables d'entrée du nœud X1 de l'exemple.**

	<b>EX11</b>	<b>EX12</b>
<b>X1</b>	P(X1= EX11)	P(X1= EX12)

P(X1= EX11) étant la probabilité pour que X1 ait la modalité EX11

### 5.1.2.2 Les probabilités conditionnelles

A chaque variable intermédiaire est attachée une table de probabilités conditionnelles (TPC).

Les TPC peuvent être renseignées :

- soit par avis d'experts,
- soit à l'aide du retour d'expérience : apprentissage (voir paragraphe 5.1.5).

Dans le cas de l'exemple précédent, les probabilités conditionnelles du nœud 4 sont données par le tableau 5.2.

**Tableau 5.2 : Table de probabilités conditionnelles du nœud 4 de l'exemple.**

<b>X2</b>		<b>EX21</b>	<b>EX21</b>	<b>EX22</b>	<b>EX22</b>
<b>X3</b>		<b>EX31</b>	<b>EX32</b>	<b>EX31</b>	<b>EX32</b>
<b>X4</b>	EX41	P(X4= EX41   EX21, EX31)	P(X4= EX41   EX21, EX32)	P(X4= EX41   EX22, EX31)	P(X4= EX41   EX22, EX32)
	EX42	P(X4= EX42   EX21, EX31)	P(X4= EX42   EX21, EX32)	P(X4= EX42   EX22, EX31)	P(X4= EX42   EX22, EX32)

EX21 et EX22 étant les modalités de X2, EX31 et EX32 étant les modalités de X3.

EX41 et EX42 étant les modalités de X4 et P(X4= EX41 | EX21, EX31) est la probabilité pour que X4 ait la modalité EX41 sachant que X2 a la modalité EX21 et X3 a la modalité EX31.

### 5.1.2.3 Les probabilités a posteriori

Les probabilités a posteriori sont calculées selon le théorème de Bayes (voir la formule 2), d'où le nom de l'outil.

Ce théorème est une conséquence de la définition des probabilités conditionnelles, donnée par la formule 1.

Soient A et B deux variables aléatoires, on a :

$$P(A \cap B) = P(A/B) P(B) = P(B/A) P(A) \quad (1)$$

#### **Théorème de Bayes [Tassi et Legait, 1990]**

Étant donné un événement B de probabilité non nulle et A1, A2, ... An un ensemble d'événements complets ( $\sum P(A_i) = 1$ ), tels que pour tout i entre 1 et n,  $P(A_i) > 0$ , on appelle théorème de Bayes la relation suivante :

$$P(A_i/B) = P(B/A_i)P(A_i) / \sum_j P(B/A_j)P(A_j) \quad (2)$$

Pour calculer les probabilités a posteriori, les réseaux bayésiens utilisent un algorithme d'inférence. Celle-ci peut être de deux formes :

- L'inférence exacte : par exemple, la méthode des arbres de jonction [Huang, Darwiche, 1996].
- L'inférence approximative : par exemple, les méthodes du type Monte-Carlo [Dagum, Horvitz, 1993].

Ce sont les logiciels qui permettent de réaliser ces calculs, cet aspect est donc complètement invisible pour l'utilisateur. Nous présentons dans ce qui suit deux produits commercialisés pour les réseaux bayésiens.

### 5.1.3 Les logiciels

Nous présentons ici deux logiciels commercialisés permettant d'utiliser les réseaux bayésiens :

- Netica est un produit Norsys Software Corporation, entreprise implantée au Canada. Une version réduite à 15 nœuds est disponible gratuitement sur le site web : [www.norsys.com](http://www.norsys.com)
- BayesiaLab est un produit de Bayesia, entreprise située en France. Une version complète en démonstration valable 1 mois est disponible sur le site web : [www.bayesia.com](http://www.bayesia.com)

### 5.1.4 Les différentes utilisations d'un réseau Bayésien

Dans quels cas utilise-t-on les réseaux bayésiens (RB) ?

Les RB sont des modèles probabilistes qui permettent de décrire des phénomènes complexes qui ne peuvent pas être modélisés analytiquement. L'utilisation des RB est recommandée lorsqu'il s'agit de résoudre un problème où il y a des dépendances entre variables incertaines, et particulièrement quand ces dépendances sont elles-mêmes incertaines.

Les réseaux bayésiens permettent :

- de modéliser et de capitaliser des connaissances (connaissances d'experts, exploitation de bases de données de retour d'expérience, de marketing, de détection de fraudes,...),
- d'étudier la dépendance entre variables (applications en sûreté de fonctionnement, [Weber et al, 2003], [Cerisier et Weber, 2003]),
- d'établir des diagnostics (applications en médecine, voir figure 5.2, et en maintenance),
- de mener des études prospectives (analyse globale du risque),
- de modéliser et de simuler des systèmes complexes (réseaux bayésiens dynamiques, voir figure 5.3),
- d'aider à la prise de décision (gestion des risques).

La figure 5.2 présente une modélisation d'un diagnostic médical, liant un symptôme « les difficultés respiratoires », à différents diagnostics possibles comme « une bronchite », « un cancer » ou une « tuberculose », et enfin aux causes possibles de ces diagnostics « visite en Asie », l'« âge » et le fait d'être « fumeur ». La figure 5.3 donne une modélisation en fonction du temps d'un système dynamique (voir aussi [Pulkkinen et al, 2004]).

Les réseaux bayésiens peuvent donc être utilisés aussi bien pour le diagnostic que pour les études prospectives, du fait que la formule de Bayes permet de calculer la probabilité d'un état sachant ses causes, mais aussi d'une cause sachant l'événement qui s'est produit. Cette caractéristique est très utile pour nous car elle permet d'avoir

un réseau générique et de préciser les valeurs de n'importe quelle variable, selon les informations disponibles, et d'en tirer toute la connaissance associée sur les variables de décision.

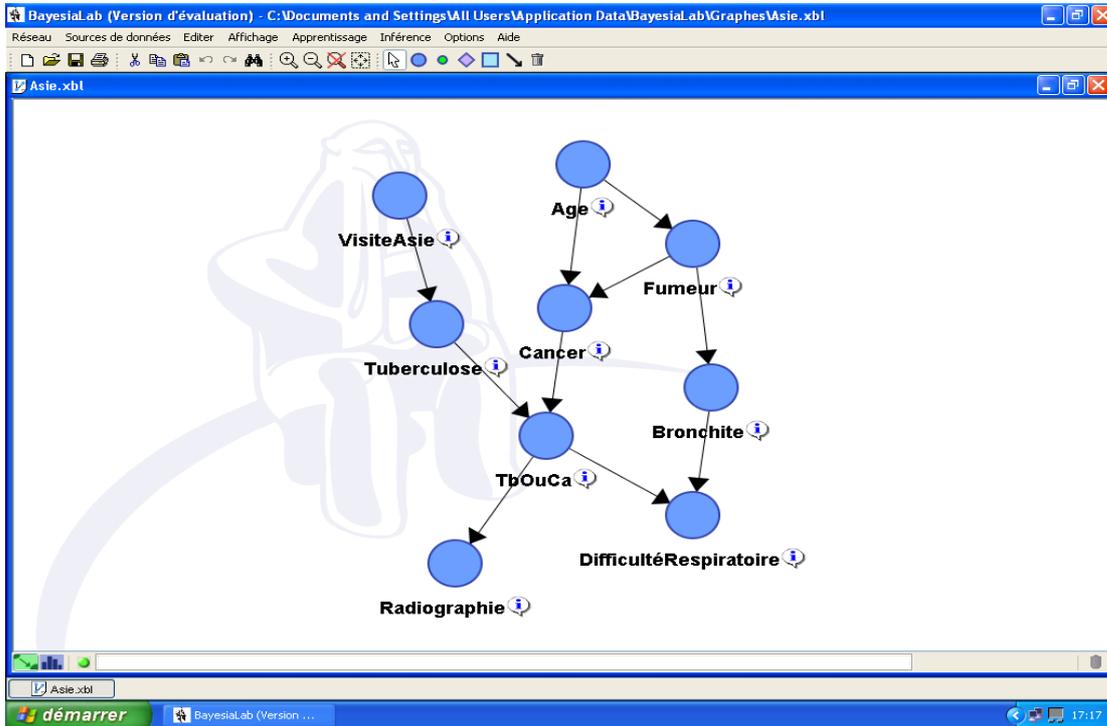


Figure 5.2 : Modélisation d'un diagnostic médical par un réseau bayésien (exemple de [BayesiaLab]).

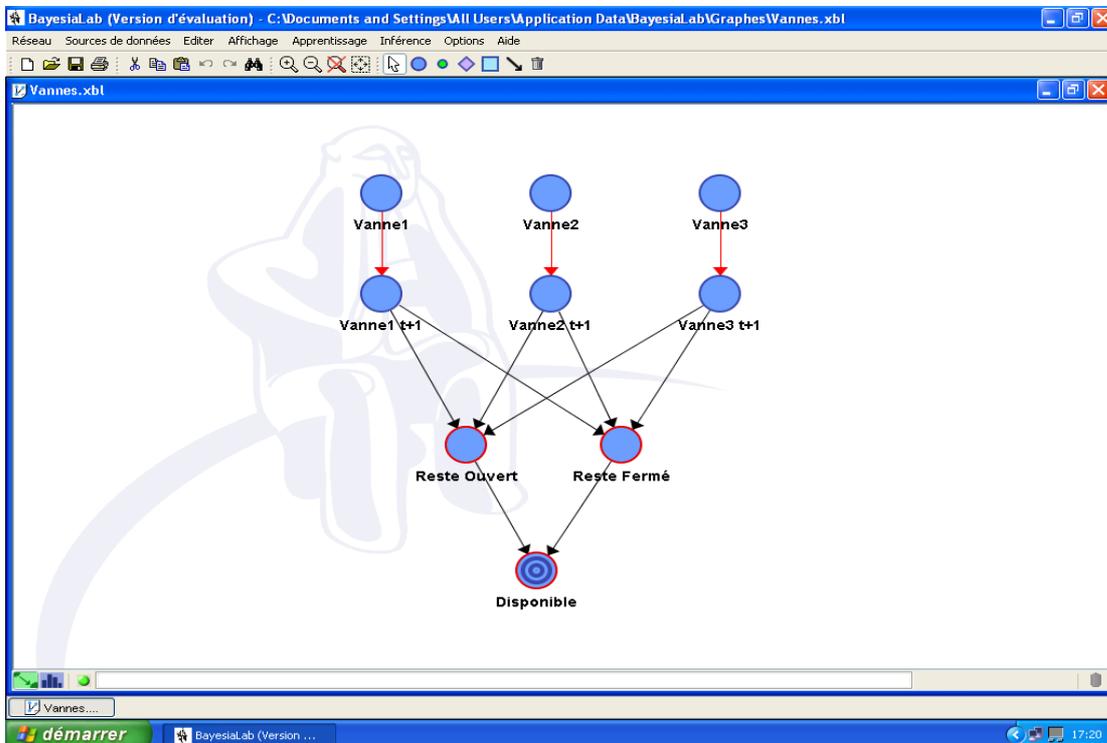


Figure 5.3 : Modélisation en fonction du temps d'un système dynamique par un réseau bayésien (exemple de [BayesiaLab]).

### 5.1.5 Construction d'un réseau bayésien

Le réseau bayésien peut être construit :

- par expertise,
- par analyse fonctionnelle [Weber, Suhner, 2002],
- par apprentissage, en exploitant une base de données (ce procédé est encore au stade de recherche et développement).

Cette construction est faite en trois étapes, données ci-dessous.

#### - Une étape descriptive : définition des variables intéressantes

Lors de cette étape, il s'agit de définir :

- les variables aléatoires pertinentes pour le problème à résoudre,
- les états associés à chaque variable aléatoire (les modalités).

#### - Une étape structurelle : mise au point du graphe de dépendances conditionnelles

Une fois les variables aléatoires identifiées, il faut définir les dépendances (les influences) qui les relient.

Chaque variable :

- **influence** d'autres variables,
- **est influencée par** d'autres variables.

On peut aussi définir la force de ces influences : faible, moyenne, forte.

#### - Une étape relationnelle : détermination des tables de probabilités conditionnelles pour chaque nœud du graphe

Il s'agit de remplir, pour chaque variable aléatoire, la table de probabilités conditionnelles qui lui est associée. Ceci permet de décrire de manière plus précise la relation de cause à effet entre les variables liées.

Cette étape relationnelle peut également être réalisée par apprentissage sur la base d'un échantillon d'individus observés (données de retour d'expérience), l'apprentissage peut calculer les différentes probabilités conditionnelles. Ainsi, l'apprentissage permet de chercher le meilleur jeu de paramètres pour rendre compte des données observées. Cet apprentissage peut être réalisé, par exemple, par le logiciel Netica qui utilise la méthode de propagation de probabilités par arbres de jonction développée dans [Lauritzen, 1988] et affinée dans [Jensen, 1990]. BayesiaLab a réalisé également des travaux importants sur l'apprentissage.

Une fois la construction du réseau terminée, on peut :

- renseigner les probabilités a priori,
- déterminer les probabilités a posteriori des différentes variables aléatoires,
- identifier les facteurs les plus influents et particulièrement ceux sur lesquels on peut agir,
- imaginer des actions sur ces facteurs importants sur lesquels on peut agir,
- et quantifier l'impact de ces actions sur les variables de sortie.

## 5.2 Les réseaux bayésiens pour l'évaluation de la pertinence des mécanismes de dégradation

Nous rappelons ici qu'il s'agit de l'étape 2 du processus d'anticipation : évaluation de la pertinence des mécanismes de dégradation potentiels. En effet, sur l'ensemble des mécanismes de dégradation jugés potentiels pour le matériel lors de l'étape 1 du processus, il faut identifier ceux qui sont pertinents à l'horizon d'exploitation visé. La pertinence traduit une possibilité d'amorçage à l'horizon  $t$  d'une dégradation due au mécanisme en question. Ainsi, un mécanisme potentiel identifié dans l'étape 1 est un mécanisme qui peut apparaître sur le matériel, il est de plus pertinent s'il peut se manifester avant la fin d'exploitation souhaitée. C'est cet aspect que nous cherchons à déterminer par l'utilisation des réseaux bayésiens.

Pour cela, nous proposons à titre d'exemple la construction par expertise d'un réseau bayésien pour l'évaluation de la pertinence de la fatigue thermique à un horizon donné pour un matériel donné. Ce réseau est générique, il peut être appliqué à n'importe quel matériel. Cependant, lors d'une application, quelques adaptations légères peuvent s'avérer nécessaires, aussi bien dans la structure que dans les probabilités conditionnelles.

### 5.2.1 Construction du réseau bayésien par expertise

La démarche adoptée pour réaliser cette construction se décline en deux points. Grâce à l'aide d'un premier expert en fatigue thermique, la structure du réseau est déterminée. Les variables et les liens d'influence sont ainsi identifiés. Un deuxième expert en fatigue thermique valide la structure en apportant les modifications éventuelles, qu'il juge nécessaires, en concertation avec le premier expert.

Une première version de la structure du réseau a été réalisée lors d'une première réunion avec l'expert 1. Lors de cette réunion, l'expert a identifié les variables influentes sur la pertinence de la fatigue thermique, et il a par la suite représenté les différents liens qui existent entre ces variables. Une autre réunion a été nécessaire pour parvenir à une version jugée satisfaisante par l'expert 1. Les différentes évolutions de cette structure sont présentées ci-après (voir les figures 5.4 et 5.5).

#### 5.2.1.1 Description des évolutions apportées à la structure

Ces évolutions sont illustrées dans la figure 5.4.

- Les trois variables « référentiel de sûreté », « marché » et « politique d'exploitation » ont été éliminées pour simplifier le réseau. En effet, on peut renseigner directement les probabilités a priori des variables qu'elles influencent : « changement de réglementation d'ici l'horizon  $t$  » et « nombre de transitoires à l'horizon  $t$  ».
- La variable « coefficient de convection » a été éliminée. L'impact de ce paramètre est déjà pris en compte dans la relation entre les variables « gradient de température » et « gradient de température dans l'épaisseur ».
- La variable « vitesse de propagation des fissures » a été exclue parce qu'elle traduit la cinétique de propagation de la dégradation, alors que nous cherchons à évaluer la probabilité d'amorçage de la dégradation à l'horizon  $t$ . Nous nous plaçons donc dans le cas où il n'y a pas d'amorçage d'une fissure ; car si c'est le cas, la probabilité pour que la fatigue soit pertinente est égale à 1.

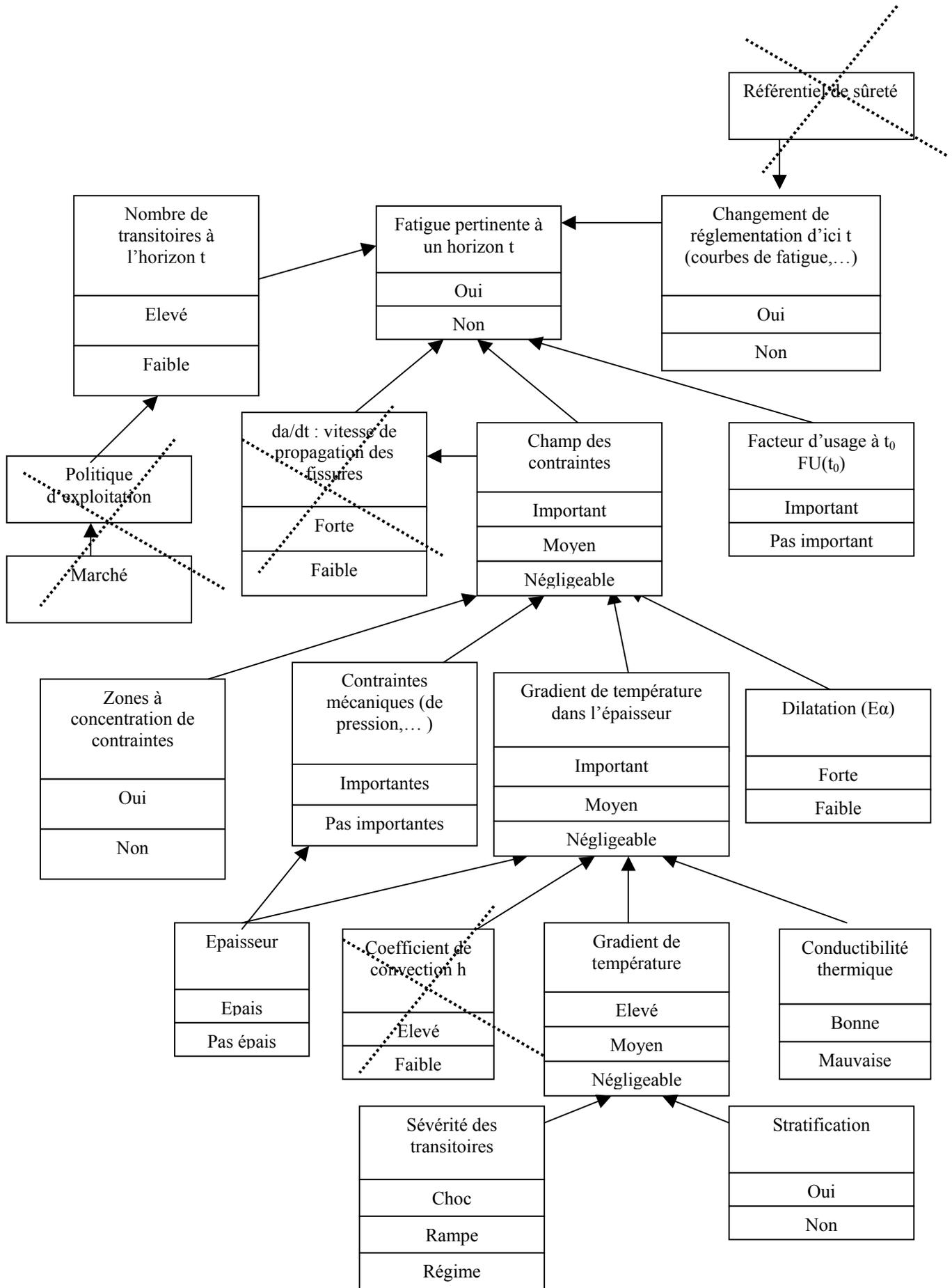


Figure 5.4 : Version 2 du réseau bayésien pour la pertinence de la fatigue thermique à un horizon  $t$ .

### 5.2.1.2 Validation

La structure du réseau a été validée par un deuxième expert qui a proposé les modifications suivantes (la nouvelle version du réseau est illustré en figure 5.5) :

- pour « gradient de température », préciser « gradient de température du fluide » ;
- pour « épaisseur » et « conductibilité thermique » (plus généralement la diffusivité), ces deux variables peuvent être considérées dans un seul bloc, car c'est leur effet combiné qui a une influence sur le gradient thermique dans l'épaisseur ;

La « dilatation thermique » intervient deux fois : pour la contrainte thermique due au gradient dans l'épaisseur et pour la contrainte de dilatation thermique due aux conditions aux limites (par exemple, l'encastrement) ; ce dernier cas peut produire des contraintes importantes ; à la rigueur, on peut inclure cette contrainte dans les contraintes mécaniques.

### 5.2.1.3 Description des variables du modèle (résultat final des deux expertises)

Voici une présentation des variables retenues du réseau (voir tableau 5.3) :

#### ▪ Les variables d'entrée

- Variable liée à la structure du matériel

**Diffusivité** : ce paramètre a une influence sur le gradient de température dans l'épaisseur et sur les contraintes mécaniques. Les deux modalités de cette variable sont **mauvaise** et **bonne**.

- Variation liées au fonctionnement du matériel :

**Stratification** : la stratification thermique est un phénomène physique lié à l'écoulement de fluides. Son influence est particulièrement importante aux interfaces liquide-vapeur ou liquide chaud-liquide froid. Ce phénomène a un impact sur le gradient de température du fluide d'un point de vue azimutal. Il est donc intéressant de savoir s'il y a : **oui** ou **non** de la stratification.

**Zone à concentration de contraintes** : cette variable permet de dire si **oui** ou **non** il s'agit d'une zone à concentration de contraintes (coudes, discontinuités géométriques, ...)

- Variation liées à l'exploitation du matériel :

**Sévérité des transitoires** : cette variable permet de décrire la répartition des transitoires selon leur sévérité. Trois types de sévérités sont distingués : le **choc**, la **rampe** et le **régime permanent**. Cette variable dépend de l'exploitation du matériel. Elle a un impact sur le gradient de température du fluide d'un point de vue temporel.

**Nombre de transitoires à l'horizon t** : le nombre de transitoires à l'horizon t traduit le niveau de sollicitation du matériel. C'est donc un paramètre d'exploitation. Deux modalités ont été fixées pour cette variable : **élevé** et **faible**.

**Facteur d'usage à  $t_0$ ,  $FU(t_0)$**  : le facteur d'usage est un paramètre calculé qui traduit l'utilisation du matériel à un instant donné. Il est égal à 1 à la fin de vie de l'équipement. Nous considérons ici le facteur d'usage à l'instant présent  $t_0$  d'observation. Cette variable a deux modalités : **important et pas important**.

- Variable liée au référentiel de sûreté :

**Changement de réglementation d'ici l'horizon  $t$  (courbes de fatigue,...)** : cette variable traduit l'évolution de la réglementation imposée par les autorités administratives. Dans le cas de la fatigue thermique, il s'agit de modifications de procédures de calcul ou de courbes de fatigue. Ces changements peuvent être **imposés** par les autorités ou **négociés** avec les exploitants.

Les variables « Changement de réglementation d'ici l'horizon  $t$  », « Nombre de transitoire à l'horizon  $t$  » et « Facteur d'usage à  $t_0$  » influencent directement la variable de sortie qui est la pertinence de la fatigue thermique à l'horizon  $t$ .

▪ Les variables intermédiaires

**Gradient de température du fluide** : cette variable est un paramètre physique qui influence le gradient de température dans l'épaisseur. Elle a trois modalités : **important, moyen et négligeable**.

**Gradient de température dans l'épaisseur** : cette variable est un paramètre physique qui influence l'amplitude des contraintes. Elle a trois modalités : **important, moyen et négligeable**.

**Contraintes mécaniques (de pression,...)** : les contraintes mécaniques peuvent être d'origines différentes, comme la pression ou les vibrations ou encore la dilatation, par exemple, lors d'un encastrement. Comme la variable précédente « Gradient de température dans l'épaisseur », elle influence l'amplitude des contraintes. Deux modalités caractérisent cette variable : **importantes et pas importantes**.

**Amplitude des contraintes** : cette variable, résultante des champs de contraintes, influence directement la variable de sortie. Elle a trois modalités : **importante, moyenne et négligeable**.

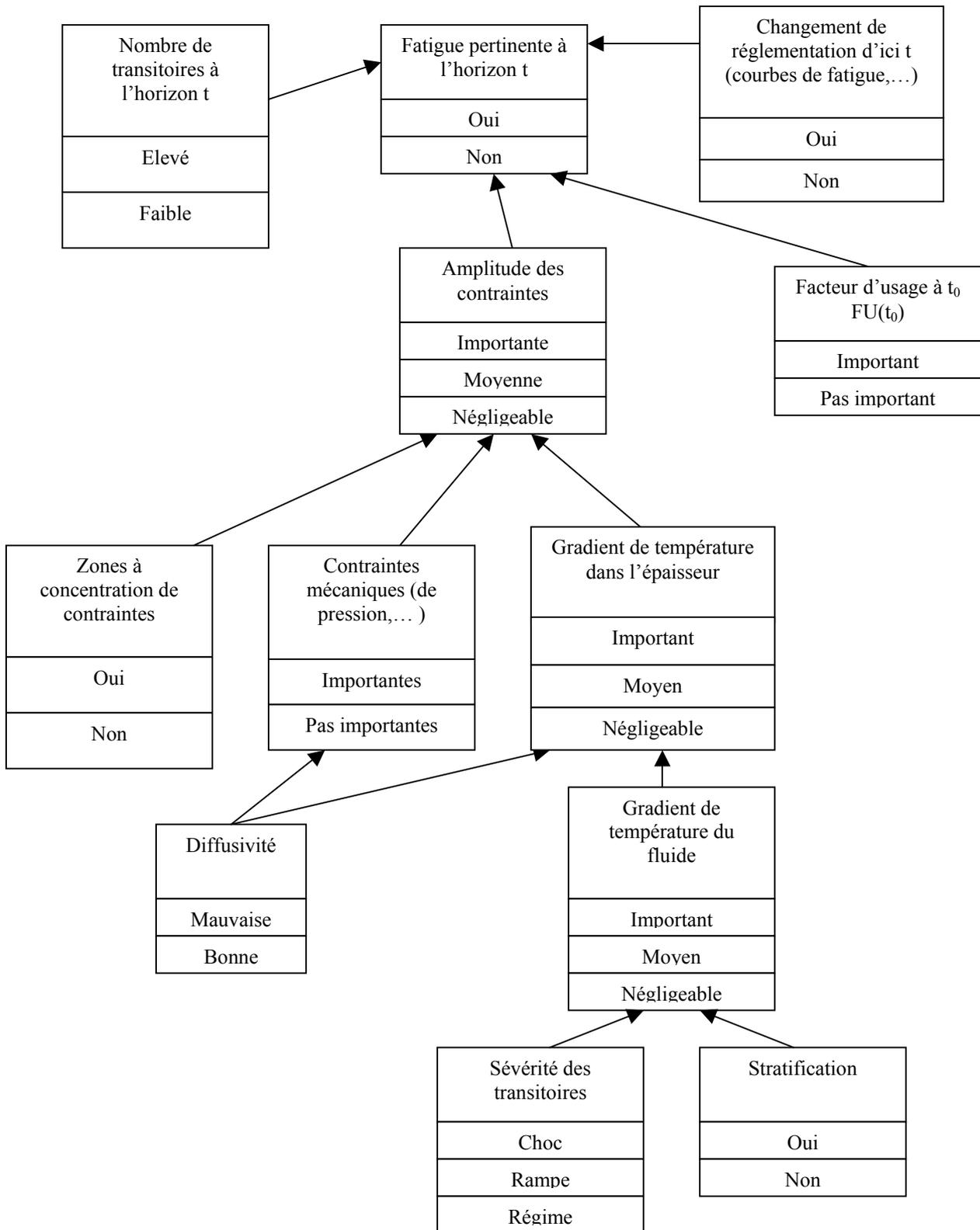
▪ La variable de sortie

**Fatigue pertinente à un horizon  $t$**  : cette variable a deux modalités **oui et non**.

Le tableau 5.3 résume l'ensemble des variables et des liens d'influence qui les relient. Les cases en blanc représentent les variables d'entrée, celles en gris claire les variables intermédiaires, et celles en gris foncé la variable de sortie.

**Tableau 5.3 : Les variables et les liens d'influence du réseau pour la pertinence de la fatigue thermique.**

<b>Variable</b>	<b>Modalités</b>	<b>Influence</b>	<b>Est influencée par</b>
<b>Stratification</b>	1- Oui 2- Non	- Gradient de température du fluide	
<b>Sévérité des transitoires</b>	1- Choc 2- Rampe 3- Régime permanent	- Gradient de température du fluide	
<b>Diffusivité</b>	1- Mauvaise  2- Bonne	- Gradient de température dans l'épaisseur - Contraintes mécaniques (de pression,... )	
<b>Zone à concentration de contraintes</b>	1- Oui 2- Non	- Amplitude des contraintes	
<b>Changement de réglementation d'ici t (courbes de fatigue,...)</b>	1- Imposé 2- Négocié	- Fatigue pertinente à un horizon t	
<b>Nombre de transitoires à l'horizon t</b>	1- Elevé 2- Faible	- Fatigue pertinente à un horizon t	
<b>Facteur d'usage à t0 FU(t0)</b>	1- Important 2- Pas important	- Fatigue pertinente à un horizon t	
<b>Gradient de température du fluide</b>	1- Important 2- Moyen 3- Négligeable	- Gradient de température dans l'épaisseur	- Sévérité du transitoire - Stratification
<b>Gradient de température dans l'épaisseur</b>	1- Important 2- Moyen 3- Négligeable	- Amplitude des contraintes	- Gradient de température du fluide - Diffusivité
<b>Contraintes mécaniques (de pression,... )</b>	1- Importantes 2- Pas importantes	- Amplitude des contraintes	- Diffusivité
<b>Amplitude des contraintes</b>	1- Importante  2-Moyenne  3- Négligeable	- Fatigue pertinente à un horizon t	- Contraintes mécaniques (de pression,... ) - Zone à concentration de contraintes - Gradient de température dans l'épaisseur
<b>Fatigue pertinente à un horizon t</b>	1- Oui  2- Non		- Amplitude des contraintes - Nombre de transitoires à l'horizon t - Changement de réglementation d'ici t (courbes de fatigue,...)



**Figure 5.5 : Version 3 du réseau bayésien pour la pertinence de la fatigue thermique à l'horizon t (t<sub>0</sub> étant l'instant d'observation).**

## 5.2.2 Quantification des probabilités

Pour la quantification, il s'agit de renseigner les probabilités conditionnelles et les probabilités a priori du réseau. Pour cela, nous avons considéré un matériel d'une centrale nucléaire, le pressuriseur et un horizon d'exploitation, 60 ans. En effet, c'est ce matériel qui a été choisi pour l'application de la démarche AVISE (voir chapitre 7).

Comme pour la structure, nous avons sollicité l'avis de deux experts pour renseigner les probabilités. Pour mener à bien cet exercice, un questionnaire a été établi afin de simplifier l'aspect probabiliste pour l'expert qui n'est généralement pas habitué à manipuler les probabilités.

### 5.2.2.1 Des questionnaires pour renseigner les probabilités a priori

Pour les variables a priori, nous avons défini une échelle : 1 - impossible (soit 2%), 2 - possible (25%), 3 - probable (50%) , 4 - très probable (75%), 5 - certain (98%). A chaque niveau de l'échelle est donc associée une probabilité exprimée en pourcentage.

Voici un exemple de question basée sur cette échelle :

Pensez-vous qu'il y a de la stratification ?

Oui	1	2	3	4	5
Non	1	2	3	4	5

Poser la question pour les deux modalités permet de vérifier la cohérence des réponses. Cependant, il est possible de poser la question pour une seule modalité et de compléter pour l'autre. Dans certains cas, l'expert peut donner directement une probabilité sans suivre les indications qualitatives de l'échelle.

### 5.2.2.2 Des tableaux pour renseigner les probabilités conditionnelles

Poser des questions qualitatives pour les variables conditionnelles devient vite très compliqué quand il y a plusieurs variables. Nous avons utilisé pour cette tâche des tableaux qui donnent une vision plus synthétique et plus claire que les questions. Le tableau 5.4 donne un exemple de tableau pour renseigner les probabilités conditionnelles de la variable « gradient de température du fluide » :

**Tableau 5.4 : Les probabilités conditionnelles du nœud « gradient de température du fluide ».**

Sévérité des transitoires	Stratification	Gradient de température du fluide		
		Elevé	Moyen	Négligeable
Choc	OUI	1		
Choc	NON			
Rampe	OUI			
Rampe	NON		2	
Régime permanent	OUI			3
Régime permanent	NON			

- Dans la case 1 du tableau 5.4, il faut indiquer la probabilité pour que le « gradient de température du fluide » soit élevé, sachant que la « sévérité des transitoires » a pour modalité un choc et qu'il y a de la « stratification ».
- Dans la case 2 du tableau 5.4, il faut indiquer la probabilité pour que le « gradient de température du fluide » soit moyen, sachant que la « sévérité des transitoires » a pour modalité une rampe et qu'il n'y a pas de « stratification ».
- Dans la case 3 du tableau 5.4, il faut indiquer la probabilité pour que le « gradient de température du fluide » soit négligeable, sachant que la « sévérité des transitoires » a pour modalité un régime permanent et qu'il y a de la « stratification ».

### 5.2.2.3 Elicitations

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats des deux expertises sur les probabilités. Les experts ne connaissant pas forcément les réseaux bayésiens, il est parfois nécessaire de présenter l'outil, ses concepts et la structure du réseau avant l'élicitation.

Les expertises ont été réalisées avec l'aide du logiciel Netica, (voir paragraphe 5.1.3). Les réseaux développés dans ce travail étant de moins de 15 nœuds, nous avons donc pu utiliser cet outil.

Un autre logiciel, BayesiaLab, développée par Bayesia en France existe sur le marché. Cependant, la version d'essai disponible sur le site web est limitée dans le temps (1 mois d'essai).

L'utilisation du logiciel lors de l'élicitation permet de montrer immédiatement à l'expert les résultats issus de ses propositions et de vérifier leur cohérence.

#### a- Expertise 1

Nous avons demandé à l'expert 1 de donner les probabilités correspondant à la pertinence de la fatigue thermique à 60 ans au niveau de la ligne d'expansion du pressuriseur (voir figure 7.1).

L'expert 1 maîtrise les probabilités. Il a donc donné directement des valeurs quantitatives, sans passer par le questionnaire qualitatif.

Pour les probabilités a priori, il s'est appuyé par deux fois sur le retour d'expérience :

- pour le facteur d'usage : la valeur du facteur d'usage donnée par le retour d'expérience est de 0,55 à 18 ans. Selon la conception, la durée d'exploitation initiale étant de 40 ans, ce facteur d'usage doit être au plus de 0,5 à 20 ans. A partir de ces données de retour d'expérience et grâce à une loi normale, l'expert a estimé la probabilité que le facteur d'usage soit important à 97,7% ;

- pour le changement de réglementation : le retour d'expérience montre que les changements de réglementation sont le plus souvent négociés avec les autorités administratives. Cette constatation peut alors être extrapolée à 60

ans. Laissant quand même un risque résiduel, l'expert a estimé à 98% la probabilité que le changement de réglementation soit négocié.

Pour les variables d'entrée concernant la structure (par exemple « la diffusivité»), le fonctionnement (par exemple « la stratification ») ou encore l'exploitation du matériel (par exemple « la sévérité des transitoires »), l'expert s'est appuyé sur ses connaissances et son expérience dans le domaine. Pour le régime d'exploitation, par exemple, l'hypothèse d'une exploitation plutôt en régime de base a été extrapolée à partir des observations actuelles.

Pour les probabilités conditionnelles, plusieurs liens d'influence traduisent des phénomènes physiques (par exemple, l'influence de « la diffusivité » sur le « gradient de température dans l'épaisseur »). Il restait donc à l'expert, qui connaissait ces phénomènes, à traduire ces liens en probabilités.

Pour les nœuds qui comportait 2 à 4 variables d'entrée, il fallait classer ces variables selon leur influence pour faciliter la quantification. La variable la plus influente a le plus d'impact sur la variable cible et vice-versa (un exemple est présenté dans le paragraphe suivant).

**b- Expertise 2**

Nous avons demandé à l'expert 2 de donner les probabilités correspondant au réseau précédent et pour le même matériel : le pressuriseur et sa ligne d'expansion à 60 ans. Après avoir expliqué la structure du réseau à l'expert, ce dernier a proposé quelques modifications concernant trois variables d'entrée (voir figure 5.6) :

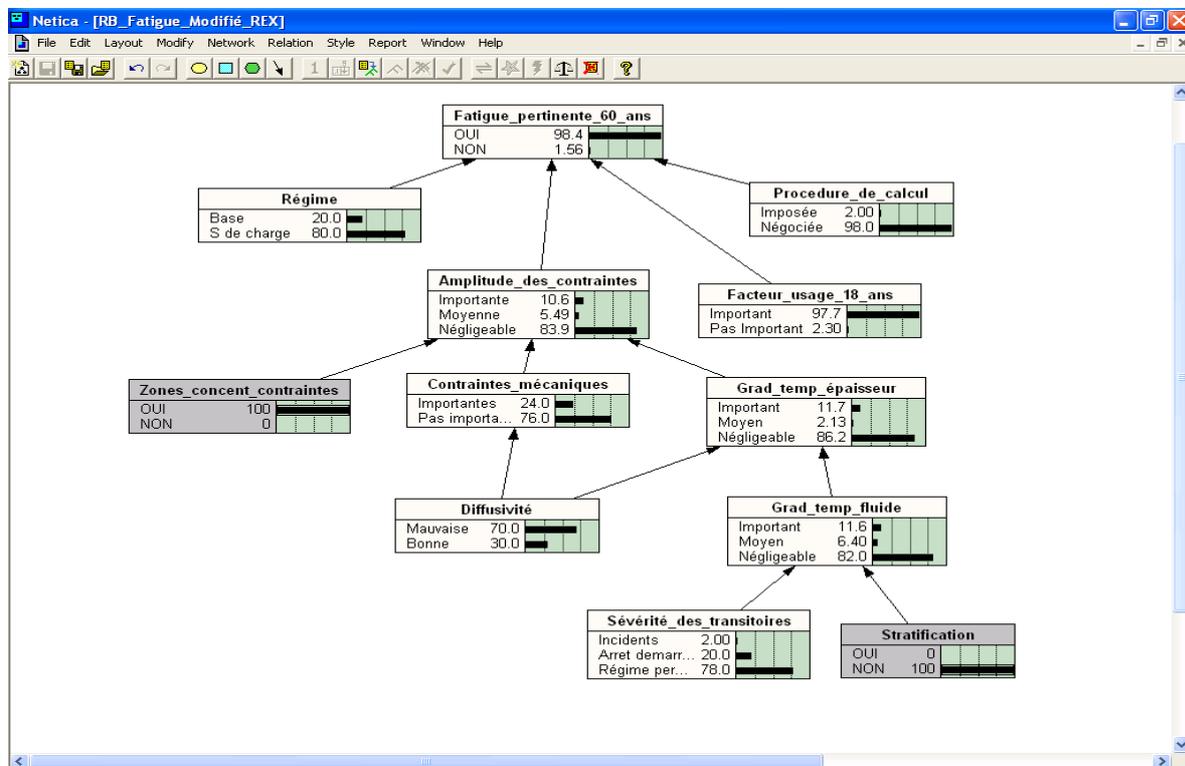


Figure 5.6 : Pertinence de la fatigue thermique à 60 ans de la ligne d'expansion du pressuriseur (réseau final, prenant en compte les deux expertises, septembre 2004).

- Pour la variable « sévérité du transitoire », il a proposé de changer les modalités **choc**, **rampe** et **régime permanent** en **incident**, **arrêts/démarrages** et **régime permanent**. Ces dernières traduisent mieux le fonctionnement du matériel.
- Pour la variable « nombre de transitoires à 60 ans », il a proposé de changer l'intitulé en « régime d'exploitation à 60 ans » avec les modalités **base** et **suivi de charge**. En effet, ces deux variables reflètent l'exploitation du matériel, mais la seconde est plus facile à quantifier.
- Pour la variable « changement de réglementation à 60 ans », il a proposé de changer l'intitulé en « procédure de calcul à 60 ans » en gardant les mêmes modalités. C'est une précision puisque la réglementation pour la fatigue thermique correspond à une procédure de calcul.

Pour les probabilités a priori, l'expert a généralement répondu au questionnaire. Cependant, pour certaines variables, il a directement donné des valeurs quantifiées.

Pour les probabilités conditionnelles, l'expert 2 a donné directement les probabilités dans les tableaux proposés par le logiciel. Comme lors de la première expertise, pour les nœuds qui comportaient 2 à 4 variables d'entrée, nous avons demandé à l'expert de les classer selon leur influence, pour faciliter la qualification. Nous présentons à titre d'exemple le tableau de probabilités conditionnelles de la variable de sortie (voir figure 5.7), qui est le nœud ayant le plus grand nombre de variables d'entrée (4 variables). Pour cet exemple, on peut remarquer que l'expert a classé les variables comme suit, par ordre d'importance :

- le facteur d'usage à 18 ans (à  $t_0$ ),
- la procédure de calcul réglementaire,
- l'amplitude des contraintes,
- le régime d'exploitation.

Facteur_u...	Procedure...	Amplitude...	Régime_d...	OUI	NON
Important	Imposée	Importante	Base	100.00	0.000
Important	Imposée	Importante	S_de_charge	100.00	0.000
Important	Imposée	Moyenne	Base	100.00	0.000
Important	Imposée	Moyenne	S_de_charge	100.00	0.000
Important	Imposée	Négligeable	Base	100.00	0.000
Important	Imposée	Négligeable	S_de_charge	100.00	0.000
Important	Négociée	Importante	Base	100.00	0.000
Important	Négociée	Importante	S_de_charge	100.00	0.000
Important	Négociée	Moyenne	Base	100.00	0.000
Important	Négociée	Moyenne	S_de_charge	100.00	0.000
Important	Négociée	Négligeable	Base	100.00	0.000
Important	Négociée	Négligeable	S_de_charge	100.00	0.000
Pas_Import...	Imposée	Importante	Base	70.000	30.000
Pas_Import...	Imposée	Importante	S_de_charge	50.000	50.000
Pas_Import...	Imposée	Moyenne	Base	30.000	70.000
Pas_Import...	Imposée	Moyenne	S_de_charge	10.000	90.000
Pas_Import...	Imposée	Négligeable	Base	10.000	90.000
Pas_Import...	Imposée	Négligeable	S_de_charge	10.000	90.000
Pas_Import...	Négociée	Importante	Base	70.000	30.000
Pas_Import...	Négociée	Importante	S_de_charge	50.000	50.000
Pas_Import...	Négociée	Moyenne	Base	30.000	70.000
Pas_Import...	Négociée	Moyenne	S_de_charge	10.000	90.000
Pas_Import...	Négociée	Négligeable	Base	0.000	100.00
Pas_Import...	Négociée	Négligeable	S_de_charge	0.000	100.00

Figure 5.7 : Tableau des probabilités conditionnelles de la variable de sortie  
« pertinence de la fatigue thermique à 60 ans ».

Ces variables ont donc été classées, selon l'expert, dans le tableau de probabilités donné par le logiciel (voir figure 5.7). Ceci a permis de simplifier pour l'expert l'estimation des probabilités conditionnelles.

Cela signifie que, d'après l'expert 2, c'est le facteur d'usage à l'instant d'observation (18 ans) qui a le plus d'influence sur la pertinence de la fatigue thermique à 60 ans. Ainsi, si le facteur d'usage est important, alors la fatigue est pertinente quelles que soient les valeurs des autres variables. Le régime d'exploitation est par contre la variable qui, selon l'expert, a le poids le plus faible.

L'expert 2 n'a pas pu donner les même valeurs de probabilités pour le pressuriseur et sa ligne d'expansion. En effet, il propose de distinguer deux zones types du pressuriseur : une zone où il y a de la stratification thermique et une zone où il n'y en a pas :

- zone avec stratification thermique : l'entrée du coude de la LEP (ligne d'expansion du pressuriseur),
- zone sans stratification thermique : le fond du pressuriseur.

Pour ces deux zones, non seulement les probabilités a priori de la variable « stratification » changent, mais également les probabilités conditionnelles de la variable « gradient de température du fluide », qui est sous l'influence de la variable « stratification ». Dans ce qui suit, nous présentons les deux réseaux bayésiens qui correspondent à chacune de ces zones, les résultats obtenus sont donnés dans les figures 5.8 et 5.9.

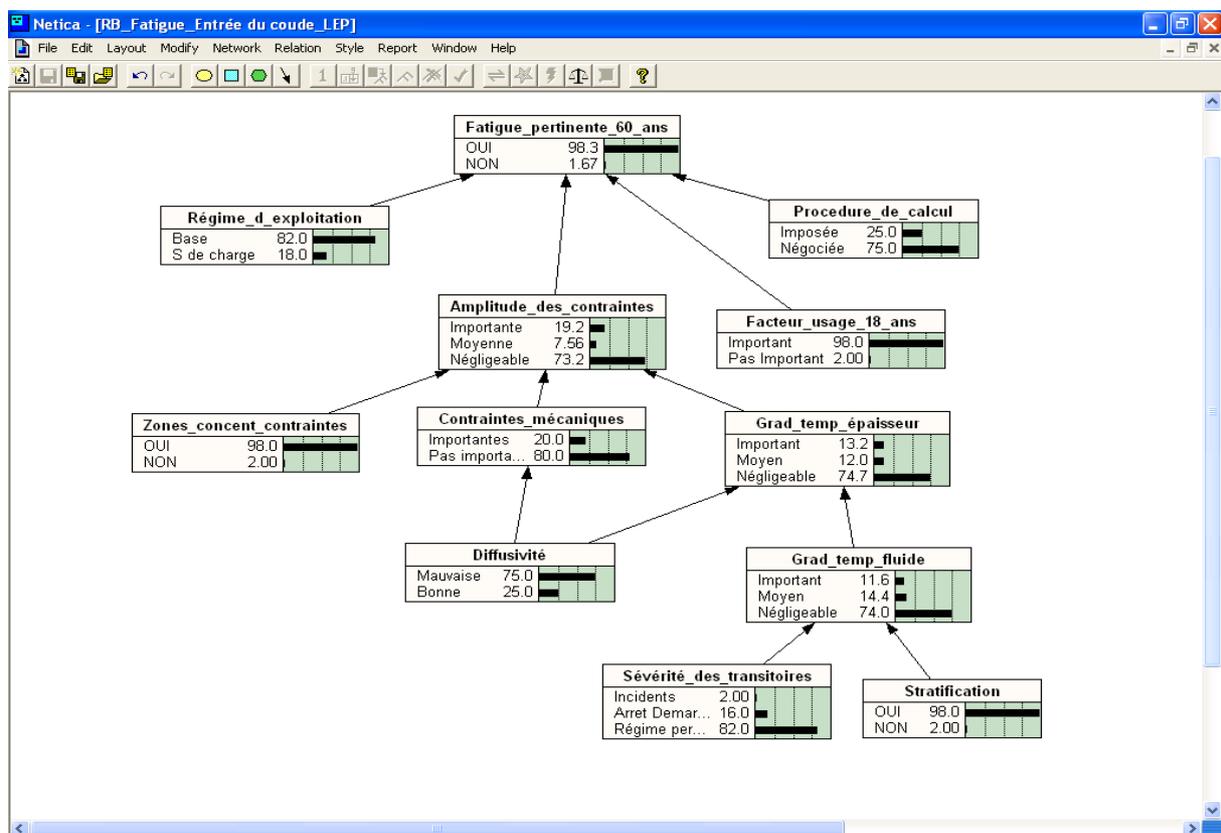
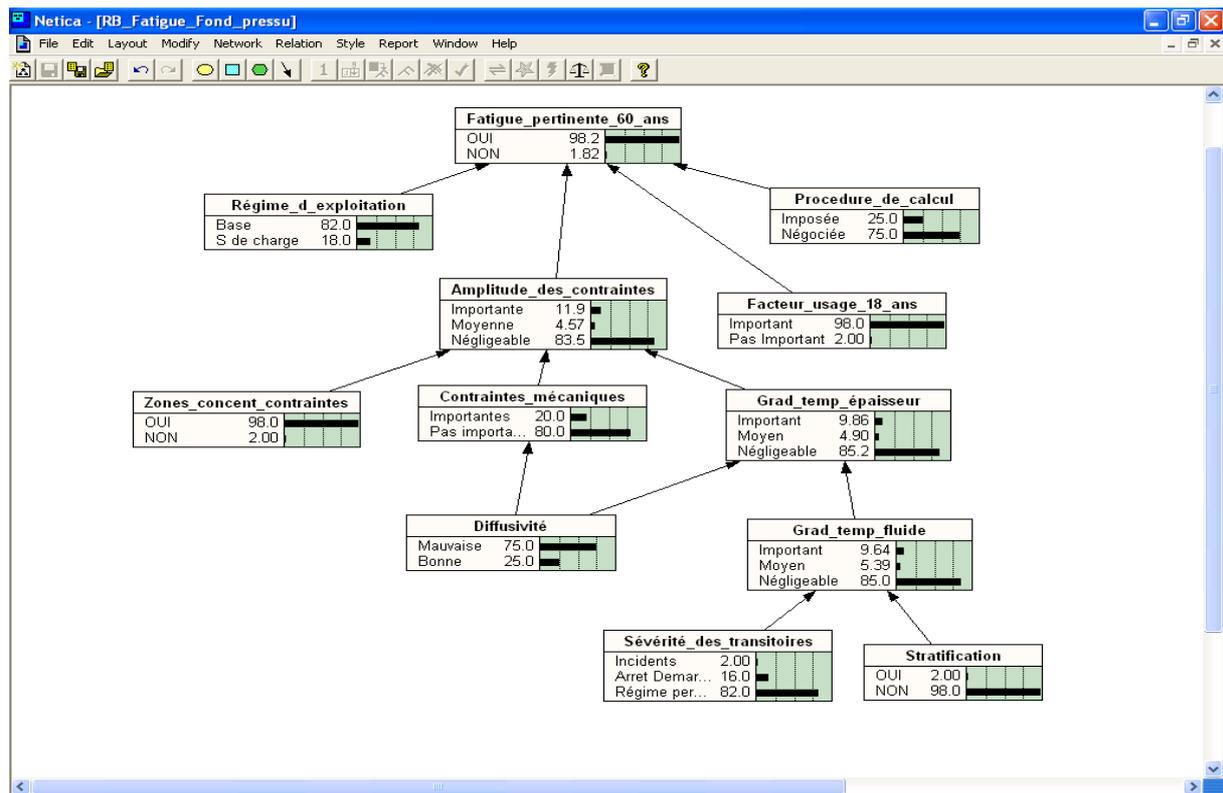


Figure 5.8 : Pertinence de la fatigue thermique à l'entrée du coude de la LEP : zone avec stratification thermique.



**Figure 5.9 : Pertinence de la fatigue thermique dans la zone du fond du pressuriseur : zone sans stratification thermique.**

Les valeurs indiquées dans les figures 5.8 et 5.9 sont celles fournies par l'expert 2.

### 5.2.3 Interprétation des résultats

Dans les deux cas, qu'il s'agisse d'une zone avec ou sans stratification, la probabilité pour que la fatigue thermique soit pertinente à 60 ans est très importante. Ceci s'explique par le fait que la valeur du facteur d'usage à l'instant d'observation (18 ans) est déjà très élevée.

### 5.2.4 Analyse de sensibilité et identification des paramètres influents

Afin d'exploiter les résultats des réseaux construits, il est important d'identifier les variables les plus influentes sur la variable de sortie et d'évaluer sa sensibilité par rapport à ces variables. Pour cela, nous proposons de modifier les probabilités d'une seule variable à la fois, toutes choses égales par ailleurs, et de regarder l'impact sur la variable de sortie.

Notons que pour la variable « sévérité des transitoires », il faut faire l'analyse de sensibilité dans les deux zones types : avec et sans stratification. En effet, les probabilités conditionnelles de la variable « gradient de température du fluide » changent en fonction de la zone. Comme il s'agit d'une variable influencée par « sévérité des transitoires », les probabilités a posteriori sont différentes selon la zone.

Le tableau 5.5 suivant résume l'ensemble des résultats obtenus.

**Tableau 5.5 : Analyse de sensibilité de la variable de sortie « Fatigue pertinente » par rapport aux variables d'entrée (probabilités exprimées en %).**

Variable	Modalités de référence	Fatigue pertinente	Modalités étudiées	Fatigue pertinente
Stratification	Oui 2, non 98	Oui 98,2	Oui 98, non 2	98,3
Sévérité des transitoires (sans stratification)	Incidents 2 arrêts/démarrages 16 régime permanent 82	Oui 98,2	Incidents 30 arrêts/démarrages 30 régime permanent 40	98,5
Sévérité des transitoires (avec stratification)	Incidents 2 arrêts/démarrages 16 régime permanent 82	Oui 98,3	Incidents 30 arrêts/démarrages 30 régime permanent 40	98,8
Diffusivité	Mauvaise 75, bonne 25	Oui 98,2	Mauvaise 25, bonne 75	98,2
Zone à concentration de contraintes	Oui 98, non 2	Oui 98,2	Oui 2, non 98	98,2
Procédure de calcul	Négociée 75, imposée 25	Oui 98,2	Négociée 25, imposée 75	98,2
Régime d'exploitation	Base 82, suivi de charge 18	Oui 98,2	Base 18, suivi de charge 82	98,3
Facteur d'usage à 18 ans	Important 98, pas important 2	Oui 98,2	Important 2, pas important 98	10,9

Nous pouvons constater suite à cette analyse de sensibilité que :

- la variable « facteur d'usage à 18 ans » est clairement le paramètre le plus influent sur la pertinence de la fatigue thermique à 60 ans,
- et comme sa valeur est très importante, à la fois d'après l'expertise et d'après le retour d'expérience à l'instant d'observation, elle masque l'analyse de sensibilité pour les autres paramètres.

Pour cela, nous proposons de refaire cette analyse en fixant la valeur du facteur d'usage à la médiane c'est-à-dire : important 50 et pas important 50 (voir tableau 5.6).

**Tableau 5.6 : Analyse de sensibilité de la variable de sortie « Fatigue pertinente » par rapport aux variables d'entrée avec une valeur moyenne du facteur d'usage (probabilités exprimées en %).**

Variable	Modalités de référence	Fatigue pertinente	Modalités étudiées	Fatigue pertinente
Facteur d'usage à t0	Important 50, pas important 50	Oui 54,5 Non 45,5	-	-
Stratification	Oui 2, non 98	Oui 54,5	Oui 98, non 2	58,3
Sévérité des transitoires (sans stratification)	Incidents 2 arrêts/démarrages 16 régime permanent 82	Oui 54,5	Incidents 30 arrêts/démarrages 30 régime permanent 40	63,1
Sévérité des transitoires (avec stratification)	Incidents 2 arrêts/démarrages 16	Oui 54,5	Incidents 30 arrêts/démarrages 30	69,4

	régime permanent 82		régime permanent 40	
Diffusivité	Mauvaise 75, bonne 25	Oui 54,5	Mauvaise 25, bonne 75	54,6
Zone à concentration de contraintes	Oui 98, non 2	Oui 54,5	Oui 2, non 98	54,1
Procédure de calcul	Négociée 75, imposée 25	Oui 54,5	Négociée 25, imposée 75	56,6
Régime d'exploitation	Base 82, suivi de charge 18	Oui 54,5	Base 18, suivi de charge 82	55,6

Suite à cette deuxième analyse de sensibilité, nous pouvons constater que :

- les variables « sévérité des transitoires » et « stratification » sont les deux variables les plus importantes après le facteur d'usage à l'instant d'observation, déjà consommé, et ceci malgré le fait qu'elles soient les variables les plus éloignées du nœud de sortie,
- l'impact de la variable « sévérité des transitoires » est plus important dans les zones où il y a de la stratification thermique,
- les variables « régime d'exploitation » et « procédure de calcul » ont un impact faible sur la variable de sortie bien qu'elles soient directement liées à celle-ci,
- les variables « zone à concentration de contraintes » et « diffusivité » ont finalement un impact très faible sur la variable de sortie.

### 5.2.5 Un réseau bayésien « générique » pour l'évaluation de la pertinence de la corrosion sous contrainte à l'horizon t

Un second réseau bayésien pour l'évaluation de la pertinence d'un mécanisme de dégradation a été construit, le mécanisme modélisé dans ce réseau est la corrosion sous contrainte (CSC). Nous décrivons ci-dessous les variables de ce réseau « générique ». Sa structure est donnée par la figure 5.10. Toutefois, il est à noter que ce réseau n'a pas été validé, ni quantifié.

#### ▪ Les variables d'entrée

- **Détensionnement** : ce paramètre décrit une procédure de fabrication. Il a une influence sur les contraintes de fonctionnement. Les deux modalités de cette variable sont **oui** et **non**.
- **Ecroûissage** : comme le paramètre précédent, l'écroûissage correspond à une procédure de fabrication. Il a une influence sur les contraintes de fonctionnement. Les deux modalités de cette variable sont **fort** et **faible**.
- **Zone à concentration de contraintes** : Cette variable permet de dire si **oui** ou **non** il s'agit d'une zone à concentration de contraintes (coudes, discontinuités géométriques, ...).
- **Contraintes résiduelles** : cette variable décrit les contraintes résiduelles qui influencent les contraintes totales du matériel. Elles peuvent être **fortes** ou **faibles**.
- **Environnement corrosif (chimie, impureté, pH, potentiel, T°,...)** : cette variable décrit l'aspect corrosif de l'environnement du matériel étudié. Elle a trois modalités : **fortement**, **moyennement** et **faiblement**.

Seule la variable « Environnement corrosif » influence directement la variable de sortie qui est la pertinence de la CSC à l'horizon t.

▪ **Les variables intermédiaires**

- **Contraintes de fonctionnement** : les contraintes de fonctionnement influencent les contraintes totales du matériel. Elles peuvent être **fortes** ou **faibles**.
- **Contraintes totales** : les contraintes totales du matériel influencent directement la variable de sortie. Elles peuvent être **fortes** ou **faibles**.

▪ **La variable de sortie**

- **CSC pertinente à un horizon t** : cette variable a deux modalités **oui** et **non**.

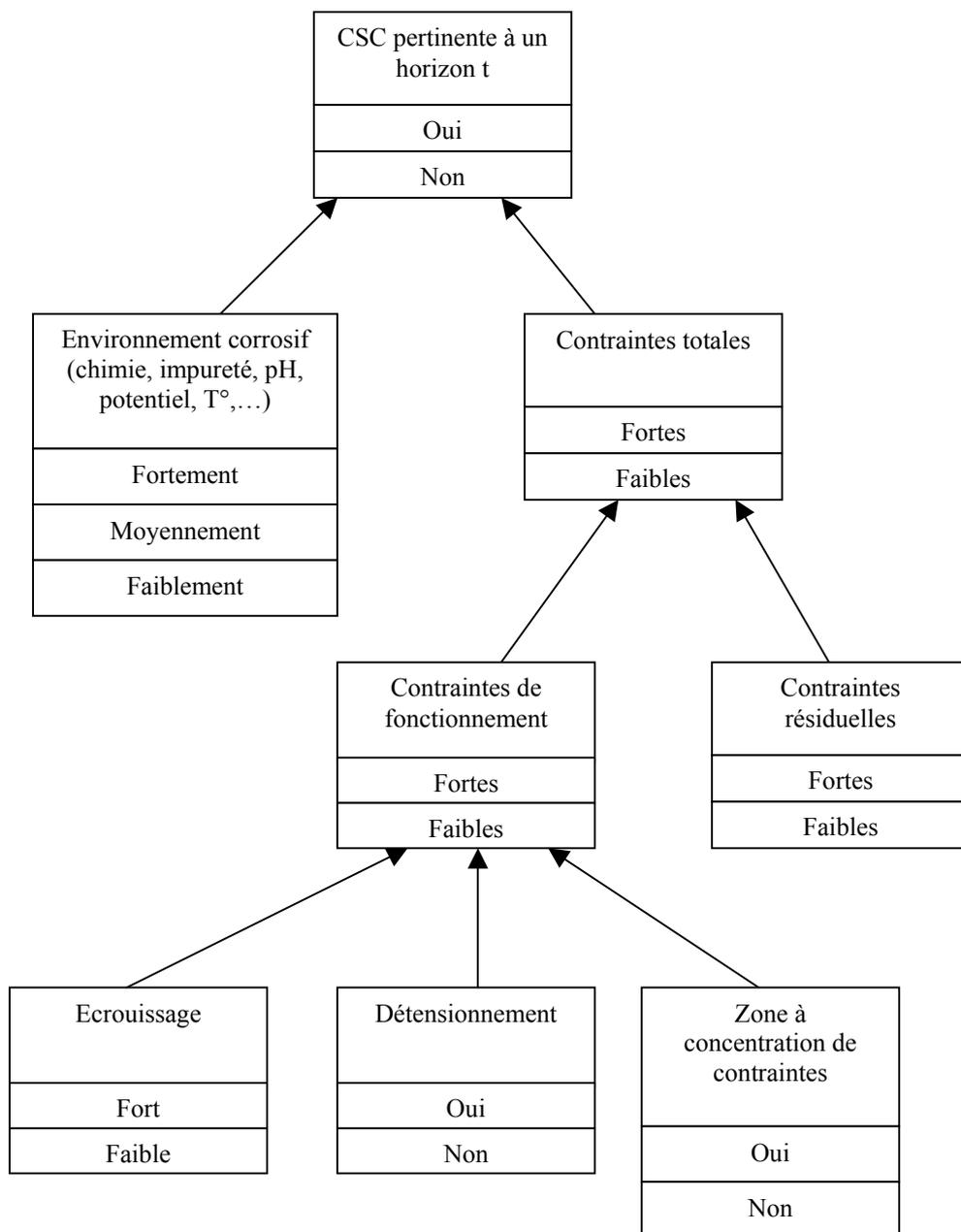


Figure 5.10 : Réseau bayésien « générique » pour l'évaluation de la pertinence de la corrosion sous contrainte à l'horizon t.

### 5.2.6 Synthèse des résultats

Un réseau bayésien « générique » pour l'évaluation de la pertinence de la fatigue thermique a été construit et appliqué à un matériel passif d'une centrale nucléaire, le pressuriseur, pour évaluer la pertinence de ce mécanisme à un horizon t d'exploitation. Nous présentons dans ce qui suit, les points forts et les points faibles de cet outil. Nous rappelons qu'un second réseau générique, relatif à la corrosion sous contrainte, a également été construit. Cependant, il n'a pas pu être validé par les experts « matériaux », ni quantifié.

#### Les points forts

La construction et l'application de cet outil n'ont pas posé de problèmes particuliers aux experts. Les concepts du modèle sont simples à assimiler et sa présentation graphique facilite la communication avec les experts.

Cet outil a permis de modéliser d'une façon graphique et simple à communiquer les connaissances expertes sur un mécanisme de dégradation et sur les facteurs qui l'influencent.

Le réseau est un excellent outil pour l'aide à la décision. En effet, l'étude de sensibilité effectuée a permis de révéler l'importance de trois paramètres, dans l'ordre : le facteur d'usage à l'instant d'observation, la sévérité des transitoires et la stratification thermique.

La stratification thermique étant un phénomène physique lié au fonctionnement du matériel (interface liquide-vapeur) et à son environnement (interface liquide chaud - liquide froid), il n'est donc pas possible d'agir sur ce dernier paramètre.

Le paramètre lié à l'exploitation du matériel, « la sévérité des transitoires », peut être modifié en appliquant une politique d'exploitation moins agressive et permettant de diminuer aussi les sollicitations du matériel. Par contre, « le facteur d'usage à  $t_0$  » est déjà consommé et donc subi.

#### Les points faibles

Il faut faire attention à l'interprétation des valeurs données par le réseau bayésien. En effet, cet outil ne donne pas de valeurs exactes, mais plutôt des estimations, des tendances et des degrés d'influence entre variables.

Pour que l'utilisation de cet outil soit généralisée à toute la démarche d'anticipation, il est nécessaire de construire les réseaux bayésiens génériques des quarante mécanismes de dégradation de la liste de référence (voir tableau 4.3). Ceci représente un travail important de la part de l'analyste et des experts et peut constituer un travail de recherche appliquée à part entière.

## 5.3 Les réseaux bayésiens pour l'évaluation de l'impact sur le vieillissement d'un mécanisme

Nous rappelons ici qu'il s'agit de l'étape 3 du processus d'anticipation : analyse et hiérarchisation des mécanismes de dégradation. Pour ce faire, nous présentons dans cette partie la construction d'un réseau bayésien pour évaluer l'impact d'un mécanisme de dégradation sur le vieillissement du matériel à un horizon  $t$ . Dans ce réseau, nous tenons compte du résultat donné par le réseau bayésien précédent sur la pertinence du mécanisme, et d'autres paramètres ayant un impact sur le vieillissement et sur sa maîtrise. Le paragraphe suivant est donc consacré à l'identification de ces paramètres et des différentes influences qui les lient.

### 5.3.1 Construction du réseau bayésien par expertise

Comme pour le réseau bayésien dédié à l'évaluation de la pertinence de la fatigue thermique, nous avons construit une structure du réseau en se fondant sur une première expertise. Cette structure a été validée par la suite par un deuxième expert.

Pour parvenir à une version satisfaisante pour le premier expert, trois réunions ont été nécessaires. Afin d'illustrer cette évolution, nous proposons dans ce mémoire la première version (voir figure 5.11) que nous comparerons à la version finale de la structure du modèle (voir figure 5.12).

#### 5.3.1.1 Description des évolutions apportées à la structure

Quatre modifications ont finalement été apportées au modèle initial :

- les liens d'influence entre les variables « REX actuel, détection » et « nouveaux défauts » ont été éliminés,
- le lien d'influence entre les variables « REX analogue » et « vieillissement à l'horizon  $t$  » a été éliminé,
- la variable « REX analogue » a été remplacée par la variable « REX extérieur »,
- la variable « avis des experts » a été remplacée par la variable « pertinence du mécanisme de dégradation à l'horizon  $t$  » avec les modalités **oui** et **non**.

#### 5.3.1.2 Description des variables du modèle

##### Les variables d'entrée

- **Pertinence du mécanisme de dégradation à l'horizon  $t$**  : cette variable traduit la pertinence, à l'horizon  $t$ , du mécanisme de dégradation étudié. Elle peut être renseignée par expertise ou à partir de la variable de sortie du réseau bayésien précédent sur la pertinence du mécanisme s'il existe. Elle a deux modalités : **oui** et **non**.

- **Cinétique du mécanisme de dégradation** : la cinétique illustre l'évolution au cours du temps des effets du mécanisme de dégradation. Elle peut être **lente** ou **rapide**.

- **REX actuel, détection** : ce paramètre traduit l'**évolution** ou la **stabilité** des situations mettant en jeu, au sein de l'entreprise, le mécanisme de dégradation étudié.

- **REX extérieur** : cette variable renseigne sur le **vieillessement** des installations extérieures à l'entreprise : est-ce que le mécanisme de dégradation étudié a été observé à l'extérieur de l'entreprise, sur le même matériel, dans les mêmes conditions d'exploitation et de maintenance ?
- **Environnement** : l'environnement représente les milieux dans lesquels évolue le matériel étudié : le système qui l'englobe et les matériels environnants. Ce cadre peut être **stable** ou **agressif**.
- **Conditions d'exploitation** : les conditions prévisionnelles d'exploitation du matériel peuvent être **stables** ou **plus exigeantes** (par exemple : régime permanent ou régime transitoire, cycles de démarrages-arrêts).
- **Procédures de maintenance existantes** : cette variable renseigne sur l'**efficacité** des procédures de maintenance existantes.
- **Réglementation** : cette variable traduit l'évolution de la réglementation imposée par les autorités administratives. Elle peut être **imposée** par les autorités ou **négociée** avec les exploitants. Une réglementation plus sévère peut exiger une maintenance plus contraignante.
- **Obsolescence** : ce paramètre traduit la disponibilité des pièces de rechange ou le vieillissement technologique. Deux modalités existent pour cette variable : **oui** et **non**.

#### Les variables intermédiaires

- **Nouveaux défauts** : les nouveaux défauts sont les nouvelles dégradations ou les nouvelles défaillances occasionnées par le mécanisme étudié qui affectent le matériel et qui n'ont pas été anticipées. Les modalités de cette variable sont **oui** et **non**.
- **Vieillessement à l'horizon t** : cette variable traduit le vieillissement à l'horizon t du matériel. Elle a comme modalités : **oui** et **non**.
- **Défaillances potentielles** : les défaillances potentielles sont celles identifiées par l'anticipation. Elles peuvent être **stables** ou **en évolution**.
- **Défaillances** : ce paramètre traduit les défaillances potentielles qui ne peuvent pas être évitées compte tenu d'une maintenance peu efficace ou d'une réglementation plus exigeante, mais aussi les défaillances réelles du matériel, celles qui sont avérées. Comme les défaillances potentielles, elles peuvent être **stables** ou **en évolution**.

#### La variable de sortie

- **Impact sur le vieillissement** : cette variable représente l'impact sur le vieillissement d'un mécanisme de dégradation sur un matériel donné à un horizon d'exploitation donné. Elle a comme modalités : **oui** et **non**.

Le tableau 5.7 résume l'ensemble des variables et des liens d'influence qui les relient (le code couleur est le même que pour le tableau 5.3).

**Tableau 5.7 : Les variables et les liens d'influence du réseau pour l'impact sur le vieillissement.**

<b>Variable</b>	<b>Modalités</b>	<b>influence</b>	<b>est influencée par</b>
<b>Pertinence du mécanisme de dégradation à horizon t</b>	1- Oui 2- Non	- Vieillissement à l'horizon t	
<b>Cinétique du mécanisme de dégradation</b>	1- Lente 2- Rapide	- Vieillissement à l'horizon t	
<b>REX actuel, détection</b>	1- Stable 2- En évolution	- Vieillissement à l'horizon t	
<b>REX extérieur</b>	1- Vieillissement 2- Non-Vieillissement	- Vieillissement à l'horizon t - Nouveaux défauts	
<b>Environnement</b>	1- Stable 2- Agressif	- Défaillances potentielles	
<b>Conditions d'exploitation</b>	1- Stables 2- Plus exigeantes	- Défaillances potentielles	
<b>Procédures de maintenance existantes</b>	1- Efficaces 2- Non efficaces	- Défaillances	
<b>Réglementation</b>	1- Imposée 2- Négociée	- Défaillances - Impact sur le vieillissement	
<b>Obsolescence</b>	1- Oui 2- Non	- Impact sur le vieillissement	
<b>Nouveaux défauts</b>	1- Oui 2- Non	- Défaillances potentielles	- REX extérieur
<b>Vieillissement à l'horizon t</b>	1- Non 2- Probable	- Défaillances potentielles	- Mécanisme de dégradation - Cinétique du mécanisme de dégradation - REX actuel, détection - REX extérieur
<b>Défaillances potentielles</b>	1- Stables 2- En évolution	- Défaillances	- Environnement - Conditions d'exploitation - Nouveaux défauts - Vieillissement à l'horizon t
<b>Défaillances</b>	1- Stables 2- En évolution	- Impact sur le vieillissement	- Procédures de maintenance existantes - Réglementation - Défaillances potentielles
<b>Impact sur le vieillissement</b>	1- Oui 2- Non		- Obsolescence - Réglementation - Défaillances

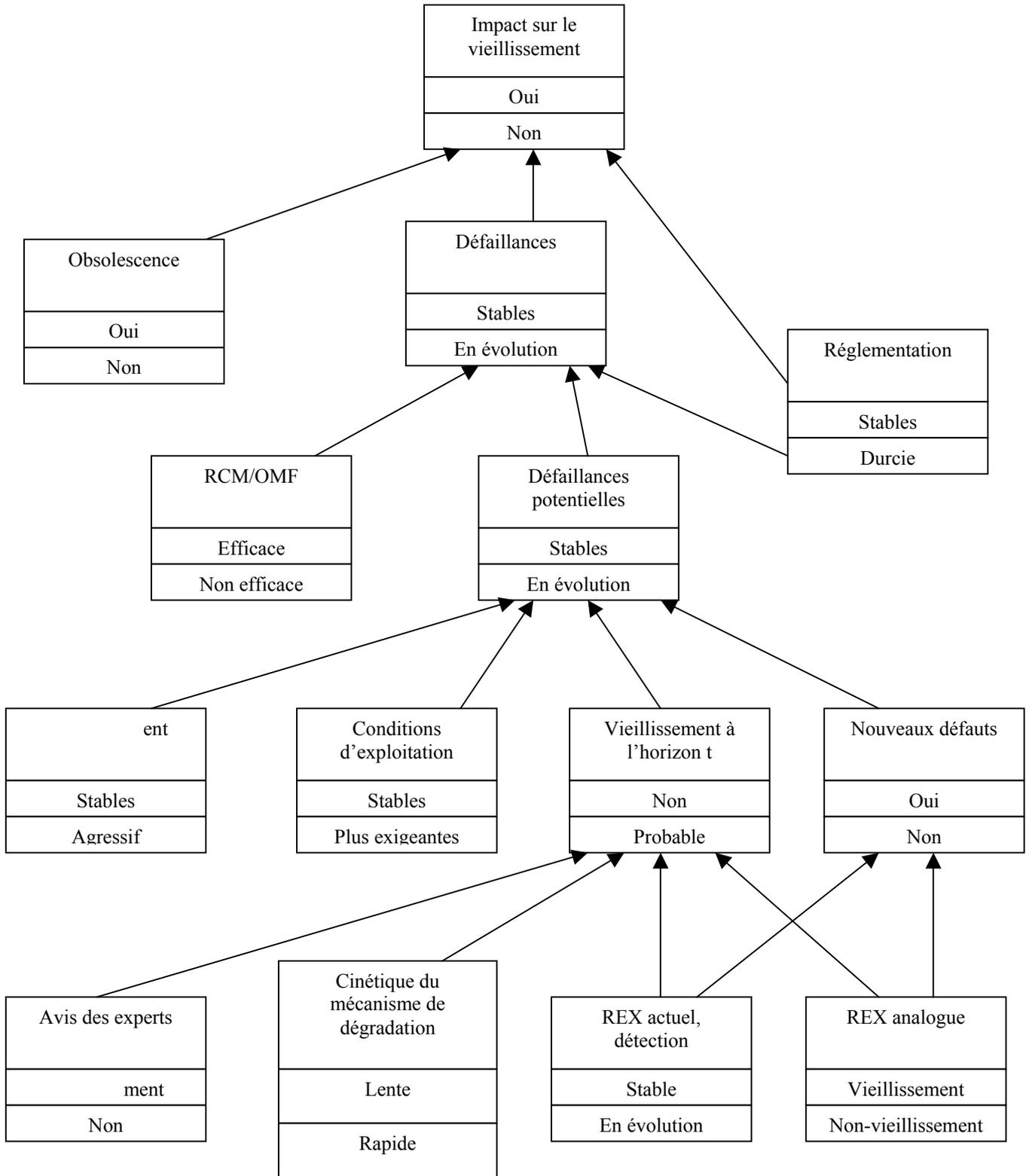


Figure 5.11 : Version 1 (novembre 2002) du réseau bayésien pour l'évaluation de l'impact sur le vieillissement d'un mécanisme de dégradation.

### 5.3.2 Quantification des probabilités

Nous proposons d'appliquer à ce réseau qui évalue l'impact d'un mécanisme de dégradation sur le vieillissement d'un matériel, le cas de la fatigue thermique. Pour cela, nous partons des résultats fournis par le réseau sur la pertinence du mécanisme appliqué au pressuriseur pour un horizon d'exploitation de 60 ans (voir figure 5.8 et 5.9).

Contrairement au réseau bayésien pour la pertinence de la fatigue thermique, nous n'avons pas pu réaliser deux expertises pour cet exemple. Cependant, les résultats obtenus ont été validés par le deuxième expert. Ces résultats sont présentés sur la figure 5.12.

Les probabilités a priori de la variable « fatigue thermique » sont issues du réseau bayésien pour la pertinence de la fatigue thermique à 60 ans de la zone du fond du pressuriseur (voir figure 5.9), toutes les autres probabilités a priori et conditionnelles ont été renseignées par expertise.

Les valeurs données par l'expert sur « l'efficacité de la maintenance » ont été validées lors d'une réunion d'experts pour la zone du fond du pressuriseur, et particulièrement au niveau de la tubulure d'expansion. Cependant, lors de cette même réunion, la maintenance a été jugée plutôt non efficace pour la zone d'aspersion.

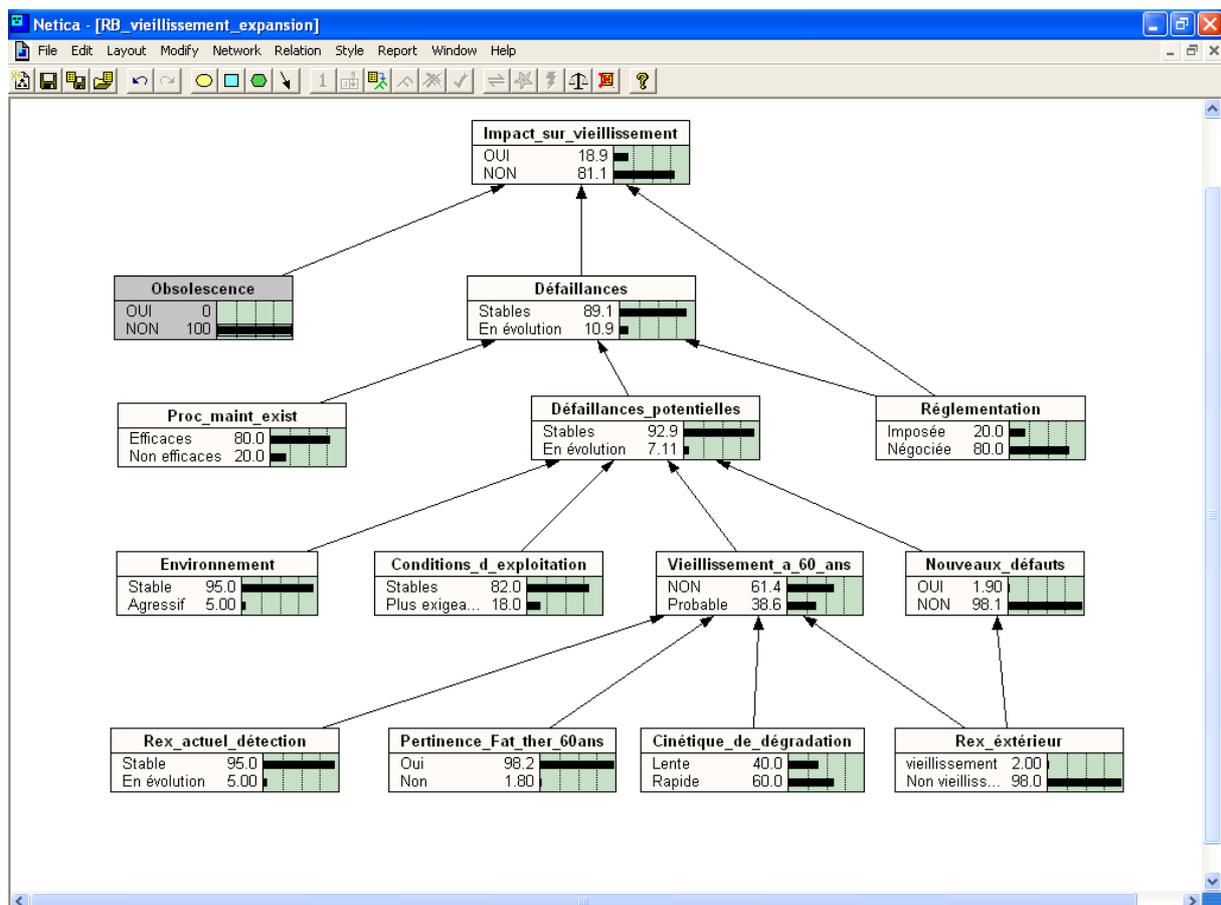


Figure 5.12 : Réseau bayésien pour l'évaluation de l'impact de la fatigue thermique sur le vieillissement du pressuriseur à 60 ans au niveau de la tubulure d'expansion (version finale du réseau).

Un deuxième réseau pour l'évaluation de l'impact de la fatigue thermique sur le vieillissement du pressuriseur à 60 ans au niveau de la tubulure d'aspersion est donné dans la figure 5.13. Etant une zone sans stratification thermique, nous gardons les mêmes valeurs pour les probabilités a priori de la variable « fatigue thermique ».

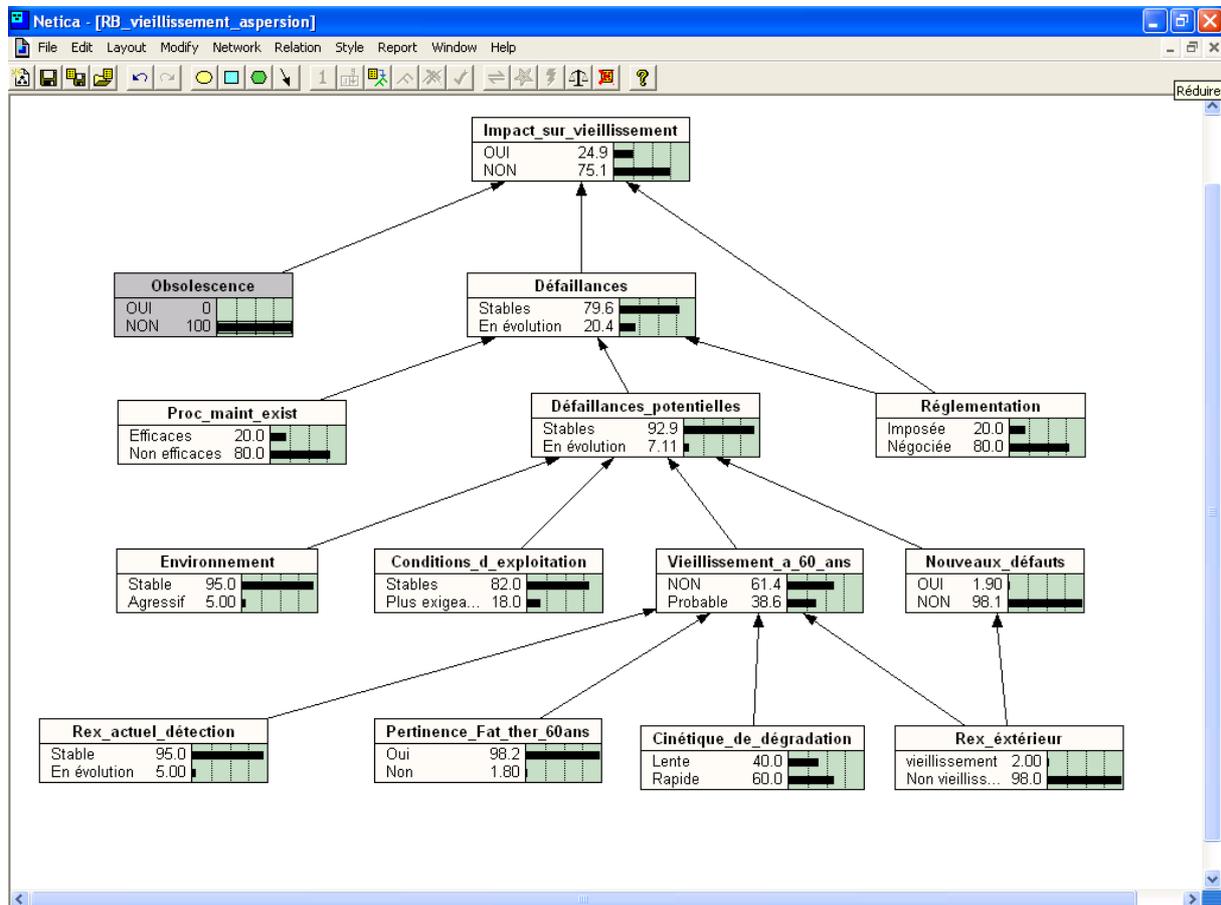


Figure 5.13 : Réseau bayésien pour l'évaluation de l'impact de la fatigue thermique sur le vieillissement du pressuriseur à 60 ans au niveau de la tubulure d'aspersion (version finale du réseau).

### 5.3.3 Interprétation des résultats

Nous remarquons dans les deux cas, aussi bien au niveau de l'expansion que de l'aspersion, que la probabilité d'un impact sur le vieillissement de la fatigue thermique à 60 ans est inférieure à 25 % malgré la pertinence du mécanisme. Ceci peut s'expliquer par le fait que la modalité « stable » de la variable « défaillances » a des probabilités élevées, respectivement 89,1 et 79,6 %.

Toutefois, l'impact est plus important au niveau de la tubulure d'aspersion (24,9 %) par rapport à la tubulure d'expansion (18,9 %). Ceci est dû au fait que la maintenance est beaucoup moins efficace au niveau de l'aspersion (20% contre 80 % au niveau de l'expansion).

### 5.3.4 Analyse de sensibilité et identification des paramètres influents

Afin d'identifier les paramètres influents du réseau, nous procédons à une analyse de sensibilité de la variable de sortie du réseau par rapport aux variables d'entrée.

Les deux réseaux précédemment présentés, appliqués au niveau de la tubulure d'expansion pour l'un et au niveau de la tubulure d'aspersion pour l'autre, donnent déjà une première analyse par rapport à la variable « procédures de maintenance existantes ». Les autres valeurs du réseau restant inchangées, cette variable passe d'un extrême à l'autre suivant le cas : maintenance efficace à 80% pour l'expansion et maintenance efficace à 20% pour l'aspersion. Nous remarquons un impact de cette variable sur la variable de sortie : impact sur le vieillissement de 18,9 % au premier cas et de 24,9 % au deuxième cas (résultat présenté dans le tableau 5.8).

C'est ce deuxième cas que nous prendrons comme référence pour l'analyse de sensibilité par rapport aux autres variables d'entrée. Nous allons donc faire varier d'un extrême à l'autre les valeurs d'une seule variable d'entrée à la fois, en partant du réseau pour l'évaluation de l'impact sur le vieillissement au niveau de la tubulure d'aspersion. Le tableau 5.8 qui suit présente l'ensemble des résultats de cette analyse de sensibilité :

**Tableau 5.8 : Analyse de sensibilité de la variable de sortie « Impact sur le vieillissement » par rapport aux variables d'entrée (probabilités exprimées en %).**

Variable	Modalités de référence	Impact sur le vieillissement	Modalités étudiées	Impact sur le vieillissement
<b>Pertinence du mécanisme de dégradation à horizon t</b>	Oui 98,2 Non 1,80	Oui 24,9 Non 75,1	Oui 2 Non 98	Oui 22,9
<b>Cinétique du mécanisme de dégradation</b>	Lente 40, rapide 60	Oui 24,9	Lente 10, rapide 90 Lente 90, rapide 10	Oui 25,8 Oui 23,5
<b>REX actuel, détection</b>	Stable 95, En évolution 5	Oui 24,9	Stable 5, En évolution 95	Oui 25,6
<b>REX extérieur</b>	Vieillissement 2, Non-vieillissement 98	Oui 24,9	Vieillissement 98, Non-vieillissement 2	Oui 58,4
<b>Environnement</b>	Stable 95, En évolution 5	Oui 24,9	Stable 5, En évolution 95	Oui 25
<b>Conditions d'exploitation</b>	Stables 82, Plus exigeantes 18	Oui 24,9	Stables 18, Plus exigeantes 82	Oui 26,1
<b>Procédures de maintenance existantes</b>	Efficaces 20, Non efficaces 80	Oui 24,9	Efficaces 80, Non efficaces 20	Oui 18,9
<b>Réglementation</b>	Imposée 20, négociée 80	Oui 24,9	Imposée 80, négociée 20	Oui 35,2
<b>Obsolescence</b>	Oui 0, non 100	Oui 24,9	Oui 100, non 0	Oui 83,4

Le tableau précédent permet de faire les remarques suivantes :

- Les variables « pertinence du mécanisme de dégradation à horizon t », « cinétique du mécanisme de dégradation », « REX actuel, détection », « environnement », « conditions d'exploitation » n'ont pas beaucoup d'effet sur la variable de sortie.
- La variable « REX extérieur » est une variable très influente sur la variable de sortie bien qu'elle en soit très éloignée (niveau 4). Mais ceci peut s'expliquer par le fait qu'elle influence deux variables de niveau 3 :

« nouveaux défauts » et « vieillissement à l'horizon  $t$  ». Si le REX extérieur met en évidence une situation impliquant le mécanisme étudié, il est probable que nous soyons en présence d'un nouveau défaut dû au vieillissement, pour lequel les procédures de maintenance sont probablement inexistantes. Ceci explique l'impact important du mécanisme sur le vieillissement du matériel.

- Les variables d'entrée de niveau 1, c'est-à-dire directement liées à la variable de sortie : « obsolescence » et « réglementation », ont un impact relativement important sur le résultat. Cependant, l'obsolescence est beaucoup plus influente que la réglementation, puisque la valeur de sortie, en cas d'obsolescence, atteint 85,5 % (pour la modalité oui de la variable impact sur le vieillissement). S'il y a obsolescence, cela veut dire qu'on ne disposera pas des pièces détachées, des moyens de réparation, ce qui est préoccupant pour le vieillissement du matériel.

### 5.3.5 Synthèse des résultats

Un réseau bayésien pour l'évaluation de l'impact d'un mécanisme de dégradation sur le vieillissement d'un matériel, à un horizon  $t$ , a été construit. Il a été ensuite appliqué à un matériel passif d'une centrale nucléaire, le pressuriseur, pour évaluer l'impact de la fatigue thermique sur le vieillissement, à 60 ans d'exploitation.

L'application de ce réseau au cas du pressuriseur a montré que les probabilités a priori dépendent des différentes zones du matériel. Ce fut le cas pour l'efficacité de la maintenance existante, dans la zone d'aspersion et la zone d'expansion du pressuriseur.

Plusieurs variables sont influentes sur la variable de sortie « impact sur le vieillissement », nous les présentons selon leur degré d'influence :

- « Obsolescence » : cette variable est très influente et elle peut être très pénalisante pour les matériels qui connaissent ce phénomène d'obsolescence. Toutefois, ce n'est pas le cas du pressuriseur.

- « REX extérieur » : le retour d'expérience extérieur s'est avéré être, d'après les experts, un indicateur important sur le vieillissement. Ce n'est pas un paramètre sur lequel on peut agir. Mais il est nécessaire de rester vigilant par rapport à son évolution.

- « Procédures de maintenance existantes » : l'efficacité de la maintenance joue un rôle significatif sur le vieillissement. C'est de plus un paramètre sur lequel il est possible d'agir : augmenter l'efficacité de la maintenance revient à diminuer l'impact du mécanisme de dégradation sur le vieillissement.

- « Réglementation » : le changement de réglementation peut impacter la variable de sortie. Comme l'efficacité de la maintenance, le changement de réglementation est un paramètre sur lequel il est possible d'agir : plus ce changement est négocié et plus l'impact sur le vieillissement est faible.

## Conclusion

Dans ce chapitre, l'utilisation de la technique des réseaux bayésiens dans le cadre de la démarche d'anticipation a été illustrée. Cet outil a été utilisé dans la phase 3 de la démarche, le processus d'anticipation, et plus particulièrement dans les étapes 2 et 3 (voir figures 2.4 et 2.7).

Pour illustrer l'utilisation des réseaux bayésiens dans l'étape 2 du processus d'anticipation, un réseau « générique » pour l'évaluation de la pertinence de la fatigue thermique pour un matériel donné sur un horizon d'exploitation  $t$  a été construit. Nous rappelons qu'un second réseau générique, relatif à la corrosion sous contrainte, a également été construit. Cependant, il n'a pas pu être validé par les experts « matériaux », ni quantifié.

Dans le cadre de l'étape 3, nous avons également construit un réseau bayésien « générique » pour l'évaluation de l'impact d'un mécanisme de dégradation sur le vieillissement d'un matériel à un horizon  $t$ .

Il est à noter que ces réseaux sont génériques dans leur structure. Cependant, pour une application donnée, l'analyste doit procéder avec l'expert à des adaptations éventuelles, si nécessaire. Ces adaptations peuvent amener à la simplification du réseau dans le cadre de l'application. En ce qui concerne les probabilités conditionnelles, nous pensons qu'elles présentent aussi un caractère générique. Dans certains cas, elles doivent être aussi adaptées à l'application. Ceci a été illustré lors de l'application au pressuriseur du réseau pour l'évaluation de la pertinence de la fatigue thermique : les probabilités conditionnelles changent selon la zone considérée (voir paragraphe 5.2.2.3, expertise 2 et figures 5. 8 et 5. 9). Il est donc important de valider à chaque application les valeurs des probabilités conditionnelles.

Une application à un matériel passif d'une centrale nucléaire, le pressuriseur, a été réalisée pour ces deux types de réseaux afin de valider le choix de cet outil par rapport à deux aspects : sa mise en œuvre et les résultats qu'il apporte.

### **Principales conclusions sur la mise en œuvre des réseaux bayésiens sont les suivantes**

- La construction et l'application de cet outil n'ont pas posé de problèmes particuliers aux experts ; les concepts du modèle sont facilement assimilés.
- La présentation graphique du réseau facilite la communication avec les experts.
- Il est intéressant d'utiliser des questionnaires pour renseigner les probabilités a priori, ceci permet de poser des questions qualitatives à l'expert qui ne peut pas toujours donner des probabilités.
- Cependant, cette technique est déconseillée pour renseigner les probabilités conditionnelles ; dans ce cas, les tableaux semblent plus adaptés.
- Pour simplifier l'estimation par l'expert des probabilités conditionnelles, une classification des variables d'entrée du nœud étudié selon leur influence sur la variable cible est conseillée.
- Ces astuces de mise en œuvre sont valables dans notre cas parce qu'il s'agit de réseaux simples avec un nombre relativement faible de nœuds (entre 12 et 14 nœuds). Pour des cas plus complexes avec un très grand nombre de

nœuds et où il n'existe pas de retour d'expérience significatif pour réaliser un apprentissage, des méthodes simplifiées existent pour recueillir les informations nécessaires à la quantification des probabilités a priori et conditionnelles ; il est notamment possible de consulter la thèse de Corset [Corset, 2003].

### **Principales conclusions sur les résultats obtenus par réseaux bayésiens**

- Cet outil a permis de modéliser, d'une façon graphique et simple à communiquer, des connaissances expertes.
- Le réseau est un excellent outil pour l'aide à la décision. En effet, il permet d'identifier les paramètres influents et particulièrement ceux sur lesquels il est possible d'agir. On peut alors imaginer une action dont on peut évaluer le gain, en introduisant une variable action ou en modifiant les valeurs de ces paramètres influents. Le décideur peut alors juger du bien fondé de l'action.
- Les valeurs des probabilités a priori et des probabilités conditionnelles peuvent être mises à jour en intégrant au fur et à mesure les données du retour d'expérience [Corset et al, 2003], [Bouchard et al, 2004].
- Il faut cependant faire attention à l'interprétation des valeurs données par le réseau bayésien. En effet, cet outil ne donne pas de valeurs exactes, mais plutôt des estimations, des tendances et des degrés d'influence entre variables.

## Chapitre 6

---

### Capitalisation de la démarche et des résultats de l'anticipation

---

Dans ce chapitre, nous traitons l'aspect « gestion des connaissances » qui intervient dans toutes les phases de la démarche AVISE. En effet, pour avoir une traçabilité de la démarche, il est nécessaire d'une part de capitaliser toutes les informations liées à l'application des différentes phases. D'autre part, il faut capitaliser aussi les résultats obtenus lors de cette application pour permettre leur réutilisation dans les futures études sur le vieillissement.

Une première partie du chapitre aborde la problématique de la gestion des connaissances dans son ensemble, puis en particulier, celle de la capitalisation des connaissances dans l'entreprise.

Ensuite, une analyse d'un exemple de base de données de vieillissement existante aux Etats-Unis, le GALL, Generic Aging Lessons Learned, est présentée.

Nous proposons, dans une troisième partie de ce chapitre, les différentes connaissances à capitaliser, aussi bien en terme de démarche, qu'en terme de résultats dans le cadre de l'application de la démarche d'anticipation. Ces connaissances ont été structurées de manière à en faciliter la saisie et à permettre une exploitation optimale des résultats. Un modèle conceptuel de données est développé pour cette capitalisation. Ce modèle a permis la création d'une base de données de vieillissement (maquette). Nous donnons la procédure à suivre pour permettre l'exploitation de cette base. Les différentes utilisations possibles de cette base sont recensées. Nous ne traitons pas cependant des aspects informatiques comme le développement des interfaces et la gestion de l'accessibilité à la base de données.

## 6.1 La capitalisation des connaissances dans l'entreprise

La capitalisation des connaissances s'inscrit dans une logique de gestion visant à collecter et stocker les connaissances et le savoir-faire de l'entreprise en vue de les diffuser et de les mettre à disposition de tous.

### 6.1.1 La connaissance

**Définition 15 :** *La connaissance est un objet, un signe, qui peut être perçu comme contenant de l'information, du sens et du contexte [Cantzler, 1996], [Ermine, 1999].*

Cette définition, s'appuyant sur l'hypothèse sémiotique [Cantzler, 1996], [Ermine, 1999], permet de projeter la connaissance sur trois axes : syntaxique (forme), sémantique (sens) et pragmatique (contexte). Cantzler considère dans ce sens que la connaissance ne peut se résumer à l'information. Celle-ci n'est qu'un point de vue, une projection de la connaissance sur l'axe syntaxique.

### 6.1.2 Les différentes typologies des connaissances de l'entreprise

Il existe plusieurs typologies des connaissances de l'entreprise. Pour Ballay, la connaissance peut être considérée comme le produit de trois ressources [Ballay, 1999] : notre expérience intime, les informations dont nous disposons et les savoirs que nous avons acquis. La connaissance, dans cette vision, dépasse et contient à la fois l'expérience, l'information et le savoir.

Selon cette définition, la gestion des connaissances doit alors prendre en compte simultanément trois ressources immatérielles : les ressources humaines porteuses de l'expérience, les processus opératoires qui instrumentalisent les savoirs et savoir-faire et les informations qui existent dans les systèmes de stockage et d'échange. Ces différentes ressources sont déjà gérées mais à travers trois paradigmes qui cohabitent sans se parler : la gestion des ressources humaines, le management opérationnel et l'informatique.

Dans le cadre de la démarche d'anticipation, les ressources porteuses de l'expérience sont les experts, le processus opératoire est celui de l'anticipation et les informations sont les données d'entrée et de sortie de ce processus, c'est-à-dire, les informations nécessaires pour l'anticipation et les résultats de la démarche.

Un ensemble de typologies s'articule autour de deux aspects essentiels des connaissances des entreprises, l'aspect tacite et l'aspect explicite. En effet, Reix [Reix, 1995] distingue deux catégories de connaissances dans l'entreprise :

- **les connaissances tacites (ou implicites)**

Il s'agit de connaissances contextuelles, liées à l'action et distribuées entre les acteurs. Barthes [Barthes, 1998], décrit cette connaissance comme le savoir-faire de l'entreprise (les habilités, les tours de mains, les « secrets de métiers », les « routines », les connaissances de l'historique, des contextes, de l'environnement...).

### - les connaissances explicites

Ce sont des connaissances formalisées. Les connaissances explicites reposent sur des supports tangibles, centralisés : ce sont les bases de données, les procédures, les algorithmes, les plans, les modèles, les documents d'analyse et de synthèse. C'est ce qui représente les savoirs pour Barthes.

Ce regard porté sur les connaissances de l'entreprise met en lumière l'importance des connaissances tacites. Il montre l'intérêt de favoriser : d'une part, les échanges et le partage de ces connaissances ; d'autre part, la transformation de ces connaissances en connaissances explicites afin d'élargir le champ des connaissances. C'est le but de la capitalisation.

### 6.1.3 Dynamique et cycle de vie des connaissances

Le regard porté sur les connaissances de l'entreprise dans les paragraphes précédents se retrouve chez Nonaka et Takeuchi [Nonaka et Takeuchi, 1995], deux auteurs japonais qui, se référant à Polanyi [Polanyi, 1967], distinguent les deux mêmes types de connaissances, explicites et tacites : « Les connaissances explicites se résument à ce qui est chiffrable, intelligible, directement compréhensible et exprimable par chaque individu dans l'organisation. Les connaissances tacites, communément appelées savoir-faire, sont propres à chaque individu ; elles sont constituées, d'une part, de son expertise technique informelle et, d'autre part, de ses croyances et aspirations personnelles considérées par les auteurs comme une forme particulière des connaissances ». Compte tenu de cette double nature des connaissances, Nonaka et Takeuchi décrivent notamment quatre modes de conversion de la connaissance au sein d'une organisation (voir figure 6.1) :

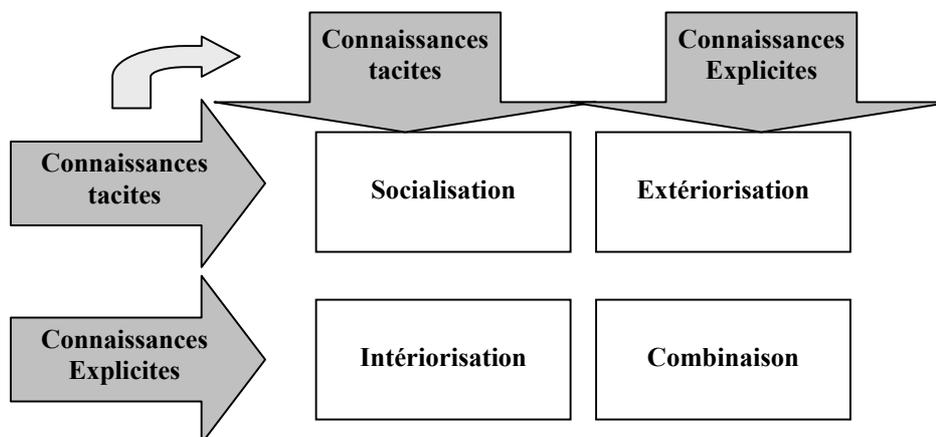


Figure 6.1 : Les quatre modes de conversion de la connaissance [Nonaka et Takeuchi, 1995].

- Du tacite au tacite, c'est la socialisation où les connaissances tacites des uns (notamment celui du maître) sont transmises directement aux autres (notamment à l'apprenti) sous forme de connaissances tacites, par l'observation, l'imitation et la pratique. Au cours de ce processus aucun des protagonistes n'explique son art pour le rendre directement accessible à tous. Ces connaissances ne pourront donc pas être exploitées au niveau collectif de l'entreprise.

- Du tacite à l'explicite, c'est l'extériorisation où l'individu essaie d'expliquer son art et de convertir son expérience en connaissances explicites.

- De l'explicite à l'explicite, c'est la combinaison où l'individu combine divers éléments de connaissances explicites pour constituer de nouvelles connaissances, explicites elles aussi.

- De l'explicite au tacite, c'est l'intériorisation où, peu à peu, les connaissances explicites diffusées dans l'organisation sont assimilées par le personnel. Ces nouvelles connaissances viennent compléter la somme des connaissances dont dispose l'individu. Elles sont intériorisées et deviennent partie intégrante de chacun. Les connaissances explicites deviennent tacites.

Pour Nonaka et Takeuchi « les connaissances explicites peuvent être facilement exprimées dans des documents mais sont moins susceptibles de déboucher sur une innovation majeure que les connaissances tacites, c'est-à-dire les connaissances acquises par l'expérience et difficilement exprimables, qui sont à la source du processus d'innovation ».

La gestion des connaissances est donc un processus extrêmement dynamique. Cette dynamique est aussi illustrée par Ballay [Ballay, 1999b] qui représente le cycle de vie des connaissances sur une courbe (voir figure 6.2) représentant le processus de valorisation en fonction du processus de diffusion et de validation. La valorisation traduit le produit de l'utilité et de la rareté ; elle enrichit ceux qui détiennent la connaissance. La diffusion et la validation traduisent le produit des besoins et des usages. Le savoir-faire largement tacite occupe la partie gauche de cette courbe, tandis que la partie droite est le domaine du savoir. Avec, bien sûr, une large zone de recouvrement entre les deux puisque l'on ne peut tracer une frontière simple et nette entre savoir et savoir-faire. Cette zone médiane, autour du seuil de valorisation, regroupe les savoir-faire individuels et les différents processus opératoires collectifs qui constituent le référentiel métier de l'entreprise.

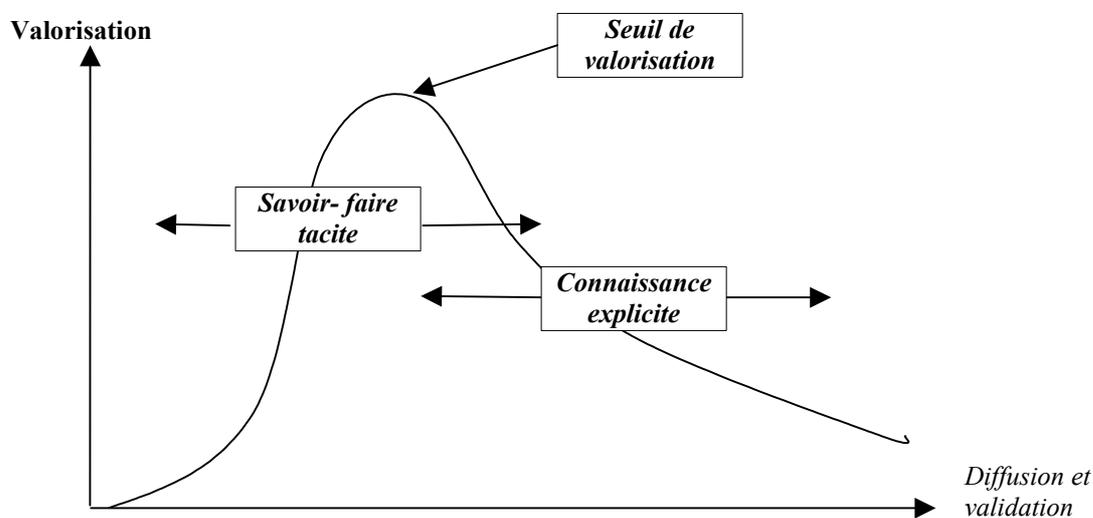


Figure 6.2 : Le processus de valorisation-diffusion des connaissances [Ballay, 1999b].

Ainsi, comme le montre la figure 6.2, une nouvelle connaissance atteint un seuil de valorisation tout en restant à diffusion réduite (rare), ensuite elle se banalise et devient une connaissance explicite commune à large diffusion.

#### 6.1.4 La gestion des connaissances et ses enjeux dans l'entreprise

Nous retenons pour la gestion des connaissances la définition proposée par Longueville [Longueville, 2003] :

**Définition 16** : *La gestion des connaissances est un processus organisationnel qui vise l'optimisation de l'utilisation des connaissances de l'entreprise [Longueville, 2003].*

La gestion des connaissances s'est affirmée dans les entreprises comme un enjeu majeur. Son essor est renforcé par les NTIC, Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication, qui engendrent des transformations structurelles rapides et l'accélération des processus de décision.

La connaissance a une grande valeur stratégique pour l'entreprise. En effet, J-L Ermine dans [Ermine, 2000] présente la connaissance comme un capital économique, une ressource stratégique, un facteur de stabilité et un avantage concurrentiel décisif. On parle ainsi actuellement de capital intellectuel et de « knowledge based economy ». Pour Bounfour, la connaissance est une des composantes du capital immatériel, une des sources majeures d'avantages concurrentiels pour l'entreprise. Le capital immatériel est placé au cœur de la formation de valeur par l'organisation [Bounfour,1999].

Ballay reprend l'idée de Mack pour dire que la connaissance, plus encore que le capital et les ressources physiques, est devenue l'ingrédient essentiel de la création de valeur [Ballay,1999c].

Dans ce contexte, la gestion des connaissances selon Ermine [Ermine, 2000] a trois objectifs :

- capitaliser : « savoir d'où l'on vient, savoir où l'on est pour mieux savoir où on va »,
- partager : « passer de l'intelligence individuelle à l'intelligence collective »
- et créer : « créer, innover pour survivre »

Ainsi, la capitalisation dans le cadre de l'anticipation, a pour objectifs de partager les connaissances, mais aussi de faciliter les applications futures de la démarche d'anticipation, de mettre à disposition des acteurs les connaissances nécessaires pour stimuler leur créativité, de mettre à la disposition des utilisateurs les données de vieillissement qui sont importantes pour les études de gestion de cycle de vie des composants et des installations.

Ces objectifs sont de réels enjeux culturels dans l'entreprise : les entreprises ne sont pas réellement disposées à se retourner sur leur passé, le partage n'est pas une tendance naturelle dans les organisations « knowledge is power » et personne ne peut forcer les gens à être créatifs. On peut alors conclure que la gestion des connaissances est un défi managérial considérable qui s'inscrit dans de nouvelles visions de l'entreprise. La gestion des connaissances ne consiste pas à attendre que les collaborateurs quittent leurs entreprises pour formaliser leurs connaissances, les diffuser et les partager. Pour Ballay [Ballay,1999c], la gestion des connaissances s'inscrit dans l'action, dans la capacité du management à anticiper, impliquer et motiver.

Nous retrouvons tous ces enjeux dans le cadre de démarche d'anticipation. En effet, le point de départ de la démarche est le passé de l'entreprise : le retour d'expérience. La source principale de connaissances est l'expert qui doit être impliqué et motivé pour partager ses connaissances, pour être créatif et identifier de nouveaux mécanismes de dégradation et de nouvelles parades.

### 6.1.5 Typologies des approches de gestion des connaissances

Plusieurs approches sont proposées pour traiter cette problématique et pour répondre aux différentes questions qui se posent : quelles sont les connaissances « cruciales » ? Où se situent-elles ? Quels outils utiliser ?

Ermine propose de classer les approches par type de connaissances gérées [Ermine, 2000] :

- **les approches d'explicitation des connaissances tacites :**

Cette catégorie regroupe deux types d'approches, un premier type est celui des approches visant la transcription des connaissances : les systèmes qualité, les fiches de retours d'expérience ou la rédaction de publications, ce sont des approches organisationnelles. Un second type permet la modélisation des connaissances, ce sont les approches de l'ingénierie des connaissances. Ces approches s'appuient sur la capitalisation des connaissances pour bâtir des mémoires d'entreprise.

- **les approches de traitement des connaissances transcrites :**

Ces approches traitent des connaissances déjà transcrites, disponibles et accessibles sous forme de données. Ces données sont stockées dans des bases de données qui peuvent atteindre des tailles gigantesques ; on parle « d'extraction des connaissances ». De nouvelles problématiques apparaissent : le « data mining » ou le « knowledge discovery ».

Une autre typologie est proposée dans [Caussanel et Chouraqui, 1999], elle distingue deux catégories d'approches :

- **les approches orientées informations :**

Dans cette catégorie, on distingue les outils qui manipulent des documents (sous toutes les formes : papier, électronique,...) et des outils qui manipulent des représentations de ces documents. Ces approches sont certes faciles à mettre en œuvre et de faibles coûts, mais elles ne permettent pas de traiter les connaissances tacites et de gérer l'aspect dynamique des connaissances.

- **les approches orientées connaissances :**

Dans cette catégorie, l'auteur distingue aussi deux groupes d'outils : les systèmes à base de connaissances qui permettent la résolution automatique des problèmes et les mémoires d'entreprise.

### 6.1.6 La capitalisation des connaissances

Pour Barthes, la capitalisation des connaissances revient à constituer un capital qui sera ensuite valorisé. Mettre en place un système pour gérer un capital de connaissances est un problème complexe, aux multiples facettes [Barthes, 1997]. Grundstein, dans [Grundstein, 2000], propose cinq facettes pour la problématique de capitalisation des connaissances de l'entreprises.

- **le repérage des connaissances cruciales :** il faut les identifier, les localiser, les caractériser, en faire des cartographies, estimer leur valeur économique et les hiérarchiser. Il s'agit des savoirs (connaissances explicites) et des savoir-faire (connaissances tacites) qui sont nécessaires aux processus de décision et au déroulement des processus essentiels qui constituent le cœur des activités de l'entreprise

- **la préservation des connaissances :** il faut les acquérir auprès des porteurs de connaissances, les modéliser, les formaliser et les conserver.

- **la valorisation des connaissances** : il faut les mettre au service du développement et de l'expansion de l'entreprise c'est-à-dire les rendre accessibles selon certaines règles de confidentialité et de sécurité, les diffuser, les partager, les exploiter, les combiner et créer des connaissances nouvelles.
- **l'actualisation des connaissances** : il faut les évaluer, les mettre à jour, les standardiser et les enrichir au fur et à mesure des retours d'expériences, de la création de connaissances nouvelles et de l'apport de connaissances externes.
- **le management** : des activités et des processus permettant d'assurer la maîtrise des connaissances dans les organisations, communément appelé « management des connaissances » dans de nombreuses publications. cette cinquième facette de la problématique de capitalisation des connaissances, concerne les interactions entre les différents problèmes mentionnés précédemment. En fait, l'expression « management des connaissances » couvre « toutes les actions managériales visant à répondre à la problématique de capitalisation des connaissances dans son ensemble ». Pour cela il faut :
  - aligner le management des connaissances sur les orientations stratégiques de l'organisation ;
  - mobiliser tous les acteurs de l'organisation, les sensibiliser, les former, les encourager et les motiver ;
  - organiser et piloter les activités et les processus spécifiques conduisant vers plus de maîtrise des connaissances ;
  - susciter la mise en place des conditions favorables au travail coopératif et encourager le partage des connaissances ;
  - élaborer des indicateurs permettant d'assurer le suivi et la coordination des actions engagées, de mesurer les résultats et de déterminer la pertinence et les impacts de ces actions.

## 6.2 Un exemple d'outil de capitalisation des données de vieillissement

Selon Lannoy et Procaccia [Lannoy et Procaccia, 2005] la base de données de vieillissement est un outil indispensable pour tout exploitant souhaitant gérer une installation et ses composants dans la durée. Cette base doit contenir toutes les informations ou références nécessaires pour une gestion technico – économique de la durabilité. Nous présentons ici un exemple de base de données de vieillissement : la base américaine GALL, Generic Aging Lessons Learned.

### 6.2.1 Description de la base GALL, Generic Aging Lessons Learned

Le GALL est la référence technique de l'autorité réglementaire américaine NRC pour la revue des demandes de renouvellement de licence d'exploitation des centrales nucléaires aux Etats-Unis..

Dans [ESReDA, 2005] la base GALL est présentée comme « un recueil exhaustif de données techniques qui décrit et documente l'aptitude de programmes américains actuels de maîtrise des vieillissements des systèmes, structures/matériels et composants des centrales nucléaires à eau légère de type bouillant (BWR) et pressurisé (PWR). Le GALL détermine si ces programmes permettent de satisfaire à une demande de prolongation de la durée d'exploitation des tranches de 40 à 60 ans, du point de vue de la sûreté et de la protection nucléaire ».

Dans le cas contraire, le GALL donne les programmes complémentaires à mettre en œuvre par un exploitant pour prétendre à cette prolongation.

Le rapport GALL comprend deux volumes, structurés de la manière suivante :

### **Volume 1 : Sommaire**

- Introduction
- Processus d'évaluation employé pour le GALL
- Application du GALL
- Conclusions et recommandations

### **Volume 2 : Répertoire de données**

#### **Chapitre I**

Ce chapitre regroupe le code ASME, American Society of Mechanical Engineers, qui est une référence pour la conception, la fabrication, l'inspection et les essais des réacteurs BWR et PWR et les ajouts nécessaires, déterminés par la NRC, pour garantir les exigences nécessaires à la maîtrise du vieillissement.

#### **Chapitres II à VIII**

Ils listent et analysent les phénomènes de dégradation des systèmes, structures/matériels et composants (« SSC » : Systems, Structures and Components) considérés pour les tranches PWR et BWR. Le GALL considère plus de 1100 « SSC ». Les composants considérés sont ceux pouvant avoir un rôle (direct ou indirect) vis-à-vis de la sûreté et de la protection nucléaire. En fait, la liste est assez conséquente et concerne la plupart des matériels d'une tranche nucléaire du fait des interactions fonctionnelles ou physiques entre systèmes.

Chaque chapitre correspond à un ensemble de systèmes (par exemple : containment structures, reactor vessel, electrical equipment,...). Dans chaque chapitre et pour chaque système, un texte précise les structures/matériels, composants inclus et les interfaces fonctionnelles et physiques du système avec d'autres systèmes. Les données sur les problématiques de vieillissement sont détaillées dans des tableaux dont chaque ligne, identifiée à un « Item GALL », correspond à :

- a- une liste de structures/matériels, composants concernés, avec l'identification :
  - du ou des matériaux employés,
  - du ou des environnements considérés (milieu, température, fluence, ...),
- b- l'effet de vieillissement considéré avec :
  - l'identification du ou des mécanismes de vieillissement le provoquant,
- c- les références des analyses et programmes évalués (cf. chapitres X et XI) avec :
  - l'analyse de leur pertinence,
  - l'identification des éléments complémentaires éventuels à instruire pour une extension de licence.

Le GALL distingue environ 820 items et apporte parfois plusieurs solutions en réponse à un item GALL (selon les conditions de conception, des matériels ou les programmes considérés).

D'autre part, le GALL considère environ 35 « effets de vieillissement » (Aging Effects) : ce sont en fait le plus souvent des effets mesurables ou des modes de dégradations (par exemple perte d'épaisseur, dommage de fatigue,...) pouvant conduire à la défaillance d'une fonction. Ces effets de vieillissement sont les conséquences de « mécanismes de vieillissement » (Aging Mechanisms) identifiés pour chaque item GALL (par exemple corrosion par piqûre, fatigue,...).

**Chapitre IX** : ce chapitre est inutilisé

**Chapitre X et XI** : analyses et programmes de maîtrise du vieillissement

Le GALL distingue deux types de programmes servant à assurer la maîtrise des vieillissements :

- **Chapitre X : analyses de phénomènes dépendant du temps (« TLAA » : Time Limited Aging Analysis),**

Ce type de programme correspond à des analyses et calculs, effectués a priori sur la base de méthodes et d'hypothèses justifiées, et utilisés pour démontrer qu'un effet de vieillissement affectant une fonction de sûreté pourra être évité pendant la période de fonctionnement incluant la période d'extension. Parmi ces TLAA, on peut citer par exemple :

- La qualification environnementale des équipements électriques,
- La fatigue des métaux de l'enveloppe de pression du circuit primaire,
- La précontrainte des tendons des enceintes de confinement en béton.

- **Chapitre XI : programmes de maîtrise du vieillissement (« AMP » : Aging Management Program).**

Ces 45 programmes comprennent diverses dispositions d'exploitation, de surveillance ou de maintenance. Les programmes considérés sont ceux mis en œuvre aux Etats-Unis dans le cadre des autorisations initiales de licence. Ils sont soit imposés par la réglementation américaine, soit recommandés par la NRC, soit développés par des exploitants ou des organismes et considérés comme de bonnes pratiques par la NRC.

## 6.2.2 Limites et intérêts de la base GALL

### Limites

De par sa vocation, le GALL n'aborde la problématique du vieillissement que sous l'aspect de la sûreté et de la protection nucléaire. De ce fait :

1. il ne traite pas de l'impact du vieillissement sur la performance, les coûts, la dosimétrie, ...
2. il ne considère pas les effets d'obsolescence ou de pertes de compétences,
3. sauf pour les effets faisant l'objet d'une analyse de phénomène dépendant du temps, il ne s'intéresse pas à la durée de vie prévisible des structures, matériels ou composants : il s'assure simplement que, pour la durée d'extension accordée, les moyens permettant de parer à une défaillance de sûreté sont programmés et permettront d'arrêter ou d'adapter le fonctionnement ou la maintenance pour empêcher que cette défaillance ne survienne.
4. reposant sur des programmes de maîtrise du vieillissement existants, il ne considère pratiquement pas les opportunités possibles (le seul point de vue de la sûreté est légèrement considéré).

### **Intérêts**

Résultat de nombreuses années de travail de la NRC en collaboration avec des laboratoires universitaires et en concertation avec les industriels, les exploitants, les constructeurs, les experts et le public, le GALL, vaste inventaire technique sur le vieillissement des tranches nucléaires, constitue en son état actuel une référence documentaire certaine.

La crainte est que cette base, développée initialement pour faciliter le renouvellement de licence, ne devienne in fine un standard réglementaire pour la surveillance du vieillissement. Le GALL amène en effet beaucoup de contraintes (nouvelles) aux exploitants pour la prolongation de licence. GALL est contestée dans son contenu par les exploitants mais approuvée dans ses concepts. Une révision est annoncée. Enfin, certains problèmes spécifiques (par exemple : l'analyse de la fatigue de certaines zones, l'inspection des zones difficilement accessibles, le gonflement des structures et composants internes, ...) ne sont pas résolus.

#### **- Intérêt des données du GALL en dehors de l'aspect sûreté**

Bien que le GALL soit fondé sur une approche sûreté, on peut modérer les limites du GALL pour l'inventaire des problématiques de vieillissement (structures et matériels, mécanismes et effets de vieillissement). En effet, du fait des interactions fonctionnelles et physiques considérées, le GALL couvre un domaine dépassant largement celui de la sûreté nucléaire « au sens strict ».

Pour l'aspect maîtrise des vieillissements, le GALL couvre par contre peu les domaines autres que la sûreté. En effet, il se préoccupe des barrières empêchant les défaillances et ne s'intéresse que peu à la prévision effective de la durée de vie des composants, matériels et structures.

Vis-à-vis d'objectifs économiques, il est certain que l'aspect prévisionnel doit être développé pour en particulier :

- les structures ou matériels non remplaçables dont la durée de vie borne celle de la tranche,
- les phénomènes d'obsolescence qui peuvent également borner la durée de vie de l'installation mais ne sont pas mis en exergue par l'approche sûreté,
- les items de vieillissements auxquels sont associés des coûts importants ainsi que les opportunités associées.

#### **- Intérêt du GALL en tant que démarche structurée**

Le GALL résulte d'une approche raisonnée et structurée sur la problématique du vieillissement. Même si cette approche a été construite vis-à-vis de considérations de sûreté, on peut penser que les concepts traités et leur agencement dans le raisonnement sont à prendre en compte dans une démarche plus globale telle que celle de l'évaluation de la durée de vie des installations.

### 6.2.3 Les données à capitaliser dans une base de vieillissement

Selon Lannoy et Procaccia [Lannoy et Procaccia, 2005], La base GALL liste les principaux champs qu'il convient de retenir dans une base de vieillissement. D'après les auteurs, les informations qu'il convient d'archiver au minimum sont les suivantes :

1. **le composant ou la structure concernée** ; ce composant ou cette structure est important pour la sûreté ou pour la perte de production ; en conséquence leur vieillissement doit être analysé et combattu.
2. **la fonction du composant concerné**; il ne faut jamais perdre de vue les aspects fonctionnels et fiabilistes ; adjoindre le découpage fonctionnel – matériel de la structure ou du composant paraît essentiel ; les modes de défaillance, les effets mesurables sont alors correctement définis et imputés aux sous-ensembles matériels ; les limites de la structure ou du composant sont connues ;
3. **le(s) matériau(x)** ; de la nature du matériau et des conditions de service vont dépendre l'apparition et le développement des mécanismes de dégradation ; il serait bon aussi d'associer à cette nature du matériau, les caractéristiques physiques et mécaniques, les cinétiques de dégradation, issues de la documentation technique, d'essais physiques ou d'estimations statistiques ;
4. **les conditions de service** ; elles concernent à la fois les conditions d'exploitation (pression, température, débit, ...) et les conditions d'environnement (milieu interne(chimie de l'eau, ...) et externe ( air salin, humidité, ...)) , les spécifications techniques d'exploitation;
5. **les dispositions réglementaires concernant le composant concerné** ; il s'agit non seulement de faire référence à toutes les réglementations existantes (appareils sous pression, dosimétrie, rejets, sécurité, séisme, ...) mais aussi aux résultats de la veille réglementaire qui doit anticiper les « menaces réglementaires » ;
6. **le retour d'expérience observé sur le composant concerné**, de la mise en service à l'instant d'observation ; cette rubrique doit être régulièrement mise à jour ; comme le matériel est important, il convient d'archiver le retour d'expérience exhaustif de défaillance et de maintenance, aucun manque ne peut être toléré, surtout si le composant ou la structure est important pour la sûreté ; notons que consigner régulièrement le retour d'expérience montre à l'autorité réglementaire que l'on maîtrise le vieillissement ; l'analyse causale des événements du retour d'expérience doit figurer dans cet item ;
7. **les mécanismes de dégradation** ; il convient de lister, pour le composant concerné et pour ses sous-ensembles matériels, compte tenu de la nature du matériau et des conditions de service , l'ensemble des mécanismes de dégradation, ceux réellement observés et ceux potentiels mis en évidence par la démarche d'anticipation ; la localisation de la dégradation sera également citée ;
8. **les effets mesurables ou les effets du vieillissement**; au regard de chacun des mécanismes du point 7 ci-dessus, on affecte les effets mesurables que l'on peut effectivement observer si un mécanisme est en jeu ;
9. **les modes de défaillance** ; de la même façon, au regard de chacun des mécanismes de la liste 7 ci-dessus, on affiche l'effet par lequel se manifeste la défaillance ou la dégradation, c'est à dire le mode ;
10. **les tâches de maintenance préventive recommandées pour différer ou éliminer le vieillissement** ; on précise le programme de maintenance préventive avec la nature des tâches et les fréquences d'intervention ;

11. **les dispositions de surveillance** , à la fois la surveillance des paramètres de fiabilité (et éventuellement d'autres paramètres) et la maintenance conditionnelle pour laquelle les paramètres physiques surveillés doivent pouvoir être reliés aisément à la fonction du point 2 ci-dessus ; l'importance de cette surveillance est capitale ; c'est elle qui permettra de détecter un éventuel vieillissement, de contrôler la cinétique de dégradation permettant ainsi de prendre les mesures correctives ou préventives à temps ; en outre, l'exploitant doit toujours avoir à l'esprit l'efficacité et la fiabilité de cette surveillance ; ce dernier point est bien évidemment le garant de la sûreté de l'installation.

## 6.3 La capitalisation dans le cadre de la démarche AVISE

Nous reprenons ici les cinq facettes pour la problématique de capitalisation des connaissances de l'entreprise données par Grundstein dans [Grundstein, 2000], que nous appliquons à l'anticipation :

**1- Le repérage des connaissances cruciales** : identifier, localiser, caractériser, faire des cartographies, estimer leur valeur économique, hiérarchiser.

Dans le cadre de l'anticipation, il s'agit de capitaliser :

1- la démarche d'anticipation : processus, acteurs, outils

2- les résultats de l'anticipation

**2- La préservation des connaissances** : acquérir, modéliser, formaliser et conserver.

Dans le cadre de l'anticipation, il faut acquérir les connaissances par l'application de la démarche d'anticipation, puis les modéliser par la création d'un modèle conceptuel de données, et enfin les conserver par la création d'une base de données.

**3- La valorisation des connaissances** : diffuser, partager, exploiter, combiner, créer

Il s'agit de diffuser, partager et exploiter les connaissances en permettant l'accessibilité de la base de données et en faisant connaître son existence.

Ensuite, il faut combiner les connaissances existantes et créer de nouvelles connaissances en permettant la recherche d'information dans la base de données.

**4- L'actualisation des connaissances** : évaluer, mettre à jour, standardiser, enrichir au fur et à mesure des retours d'expériences, de la création de connaissances nouvelles et de l'apport de connaissances externes.

Il faut donc permettre l'actualisation de la base de données.

**5- Le management** : mobiliser, sensibiliser, former, motiver, organiser, piloter, ...

Ce dernier aspect est essentiel à l'intégration et au bon fonctionnement de la démarche d'anticipation du vieillissement.

Afin de permettre la capitalisation dans le cadre de la démarche d'anticipation du vieillissement, nous nous proposons de construire une base de données de vieillissement qui permet

- de capitaliser la démarche et les résultats de l'anticipation du vieillissement d'un matériel,
- de pouvoir consulter ces informations,
- de pouvoir combiner ces informations pour créer des connaissances utiles,
- et de pouvoir mettre à jour ces informations.

Pour cela, il faut d'abord identifier les informations à capitaliser et les structurer dans un modèle conceptuel de données. Ce modèle permet de créer ensuite une base de données. Un certain nombre d'interfaces de saisie des données en vue de leur stockage et de leur mise à jour dans la base seront présentées à titre d'exemple. Ensuite, les différentes utilisations possibles de cette base seront recensées.

### **6.3.1 Identification des connaissances à capitaliser**

Deux types de connaissances sont à capitaliser dans le cadre de cette démarche d'anticipation : le déroulement de la démarche et ses résultats. Ces connaissances identifiées lors de la construction de la démarche d'anticipation, ont été validées lors de l'application de la démarche au pressuriseur (voir chapitre 7). La base GALL et Lannoy et Proccacia dans [Lannoy et Procaccia, 2005] (voir paragraphe 6.2.3), bien que moins ambitieux confirment cette liste des connaissances.

#### **6.3.1.1 Capitalisation du déroulement de la démarche d'anticipation**

Il est important de capitaliser le déroulement de la démarche d'anticipation. Ceci permet de garder une trace de l'état des connaissances et des expertises sur lesquels la démarche s'est basée. Cela fournit également une traçabilité et une justification des résultats obtenus.

L'élément central autour duquel s'organise cette capitalisation est bien sûr le matériel. Pour chaque matériel étudié, il faut donc pouvoir retrouver les différentes informations qui décrivent l'application de la démarche à une date donnée. Nous proposons alors de regrouper l'ensemble de ces informations sur un même support, et de les structurer selon les différentes phases de la démarche d'anticipation. Afin de faciliter cette capitalisation, nous proposons à l'analyste de s'appuyer principalement sur les documents générés tout au long de la démarche et de minimiser au maximum les saisies supplémentaires d'informations qui sont souvent perçues comme une tâche fastidieuse, inutile et par conséquent souvent négligée.

Ainsi, à chaque matériel M, est associé un dossier d'anticipation daté qui regroupe les informations suivantes :

- date du début de l'application,
- date de fin de l'application,
- nom de l'analyste,
- noms et compétences des experts participants,
- différentes phases de la démarche.

A chaque phase sont rattachés les documents générés lors de l'application :

#### **Phase 1 : Définition du contexte et des objectifs de la démarche d'anticipation**

- Document 1 : Contexte et objectifs de la démarche d'anticipation du vieillissement pour le matériel M.

#### **Phase 2 : Identification et collecte de l'information nécessaire pour l'anticipation**

- Document 2 : Informations nécessaires à l'anticipation du vieillissement pour le matériel M.

#### **Phase 3 : Interrogation d'experts pour l'anticipation du vieillissement**

Etape 1 : Identification des mécanismes de dégradation potentiels

Etape 2 : Etude de la pertinence des mécanismes identifiés

Etape 3 : Analyse et hiérarchisation des mécanismes de dégradation

Etape 4 : Identification et évaluation des parades potentielles

A chaque étape du processus d'anticipation, plusieurs documents sont rattachés :

- Les ordres du jour des réunions,
- les documents et outils présentés ou utilisés au cours des réunions,
- les comptes-rendus des réunions.

Dans ces documents, nous retrouvons pour chaque réunion, la date, le lieu, la durée, les participants, les différents points traités et les résultats obtenus.

#### **Phase 4 : Synthèse et capitalisation**

- Document 3 : Résultats de l'anticipation du vieillissement pour le matériel M.

### **6.3.1.2 Capitalisation des résultats de la démarche d'anticipation : élaboration d'un modèle conceptuel de données**

On peut se référer à la figure 6.3 qui montre le modèle conceptuel de données. Nous classons les résultats obtenus lors de l'application de la démarche en deux ensembles :

#### **Groupe 1 : les informations existantes collectées lors de l'application**

Ce groupe correspond à des informations collectées lors de la phase 2 de la démarche. Nous les structurons comme suit, en six entités :

**1- Le matériel** : il s'agit du matériel étudié lors d'une application de la démarche. C'est donc un matériel critique pour l'installation en termes de sûreté, de disponibilité et de coûts. Pour ce matériel, nous précisons ses fonctions principales, ses schémas techniques, son affectation, c'est-à-dire l'installation au sein de laquelle il est intégré, le milieu interne, le milieu externe, la réglementation et finalement l'obsolescence.

D'autres caractéristiques concernant le matériel, et nécessitant une description par plusieurs attributs, sont présentées dans des entités, liées à l'entité matériel par des relations.

**2- Le régime d'exploitation** : le matériel peut fonctionner selon un ou plusieurs régimes d'exploitation, que l'on caractérise par un certain nombre d'attributs : la périodicité, la température (ou un intervalle de température), la pression (ou un intervalle de pression), le débit, la comptabilisation des situations (transitoires d'exploitation entre deux régimes donnés) consommées par le matériel et le retour d'expérience des écarts par rapport aux conditions nominales.

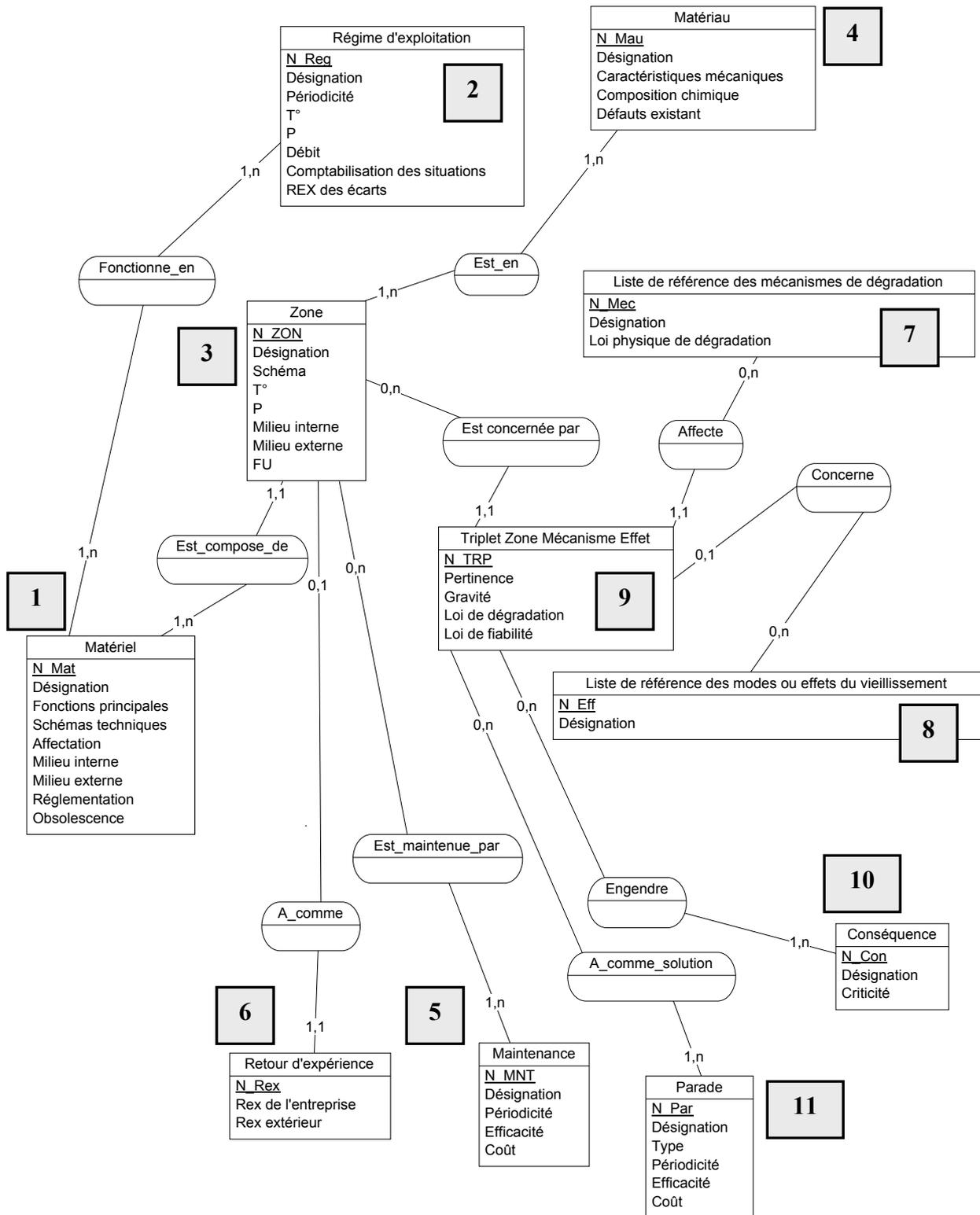


Figure 6.3 : Modèle conceptuel de données pour la capitalisation des résultats de la démarche d'anticipation (réalisé sous le logiciel PowerAMC).

**3- La zone** : le matériel étudié se compose généralement de plusieurs zones (composants, soudures, ...). C'est d'ailleurs, par rapport aux différentes zones que nous avons caractérisé le vieillissement. Pour chaque zone, nous associons des schémas techniques, une température (ou un intervalle de température), une pression (ou un intervalle de pression), les caractéristiques des milieux chimiques interne et externe à la zone et le facteur d'usage.

Comme pour le matériel, certaines des caractéristiques de la zone, nécessitent l'utilisation d'entités à part entière car elles sont elles-mêmes renseignées par un ensemble d'attributs.

**4- Le matériau** : une zone est composée d'un ou plusieurs matériaux (une soudure bimétallique, par exemple), pour chaque matériau, nous proposons de renseigner ses caractéristiques mécaniques, sa composition chimique et les éventuels défauts existants (particulièrement les défauts de fabrication au niveau des soudures).

**5- La maintenance** : pour chaque zone, nous pouvons associer une ou plusieurs opérations de maintenance préventive, comme les inspections par exemple. A cette maintenance on peut associer une périodicité et un coût. Mais nous pouvons aussi affecter une efficacité. Cette caractéristique est un résultat de l'étape 4 du processus d'anticipation.

**6- Le retour d'expérience** : un retour d'expérience correspond à chaque zone. Deux types de retour d'expérience peuvent alors être distingués ; le retour d'expérience de l'entreprise et le retour d'expérience extérieur.

## **Groupe 2 : les résultats sur le vieillissement obtenus par expertise lors de l'application**

Ce groupe correspond à des informations collectées lors de la phase 3 de la démarche. Nous les structurons comme suit, en cinq entités :

**7- La liste de référence des mécanismes de dégradation** : cette entité correspond aux mécanismes de dégradation recensés dans la liste de référence. Pour chaque mécanisme, il est possible d'associer, si elle est connue, une loi physique de dégradation.

**8- La liste de référence des modes ou effets du vieillissement** : il s'agit ici des modes ou effets de vieillissement recensés dans la liste de référence.

**9- Le triplet Zone/Mécanisme/Effet** : nous trouvons en cette entité, le résultat principal de la démarche, issu de l'étape 1 du processus d'anticipation. Il s'agit de l'association entre une zone et un mécanisme de dégradation potentiel. Ce mécanisme pouvant provoquer un effet du vieillissement, nous parlons alors de triplet Zone/Mécanisme/Effet. Cette entité a donc des liens entre les entités « Zone », « Liste de référence des mécanismes » et « Liste de référence des effets du vieillissement ». A ce triplet, on peut associer une pertinence, résultat de l'étape 2 du processus d'anticipation et une gravité, résultat de l'étape 3 du même processus. S'il s'agit d'un triplet avéré, nous pouvons aussi associer une loi de dégradation ou une loi de fiabilité.

Comme c'est le cas pour les entités « Matériel » et « Zone », deux caractéristiques associées à l'entité « Triplet Zone/Mécanisme/Effet » ont elles-mêmes plusieurs attributs. Nous les représentons alors par les deux entités suivantes.

**10- La conséquence** : un triplet peut engendrer une ou plusieurs conséquences, identifiées lors de l'étape 4 du processus d'anticipation. A chaque conséquence, on peut associer une criticité.

**11- La parade** : pour chaque triplet, on a identifié lors de l'étape 4 du processus d'anticipation, une ou plusieurs parades caractérisées par un type, une périodicité, une efficacité et un coût. Le type correspond à l'un des quatre types de parades définis au chapitre 2 (voir paragraphe 2.4.2, Etape 4). La périodicité, l'efficacité et le coût sont donnés par expertise lors de l'étape 4.

Comme montré par la figure 6.3, nous définissons entre ces entités des relations qui permettent de caractériser le type de lien qu'elles entretiennent. Pour chaque lien nous définissons une cardinalité. Quatre possibilités de cardinalités existent entre deux entités A et B :

0,1 : à chaque élément de l'entité A correspond 0 ou au plus 1 élément de l'entité B.

1,1 : à chaque élément de l'entité A correspond au moins 1 et un seul élément de l'entité B.

0,n : à chaque élément de l'entité A correspond 0 ou n éléments n de l'entité B.

1,n : à chaque élément de l'entité A correspond au moins 1 ou n éléments de l'entité B.

Nous décrivons ces relations dans ce qui suit :

- La relation « **Fonctionne en** » lie les entités « Matériel » et « Régime d'exploitation ». Elle traduit le fait qu'un matériel fonctionne selon au moins un ou plusieurs régimes d'exploitation (1,n). Un régime d'exploitation peut correspondre à au moins un ou plusieurs matériels (1,n).

- La relation « **Est composé de** » lie les entités « Matériel » et « Zone ». Elle traduit le fait qu'un matériel est composé d'au moins 1 ou plusieurs zones (1,n). Par contre, une zone correspond à un et un seul matériel (1,1).

- La relation « **A comme** » lie les entités « Zone » et « Retour d'expérience ». Elle indique qu'une zone peut avoir 0 ou 1 retour d'expérience (0,1). Un retour d'expérience correspond forcément à une et à une seule zone (1,1).

- La relation « **Est maintenue par** » lie les entités « Zone » et « Maintenance ». Elle indique qu'une zone peut avoir 0 ou n maintenances (0,n) et qu'une maintenance correspond à au moins une ou plusieurs zones (1,n). En effet, un même contrôle (par ultrasons, par exemple) peut être appliqué à plusieurs zones.

- La relation « **Est en** » lie les entités « Zone » et « Matériau ». Elle traduit le fait qu'une zone est composée par un ou plusieurs matériaux (1,n) et qu'un matériau correspond à une ou plusieurs zones (1,n).

- La relation « **Est concernée par** » lie les entités « Zone » et « Triplet Zone/Mécanisme/Effet ». Elle indique qu'une zone est concernée par 0 ou plusieurs triplets (0,n). En effet, si une zone n'est concernée par aucun mécanisme de dégradation potentiel, elle n'est alors concernée par aucun triplet qui lie une zone à un mécanisme potentiel et à un effet du vieillissement qui pourrait en résulter. D'autre part un triplet correspond à une zone et une seule zone (1,1).

- La relation « **Affecte** » lie les entités « Liste de référence des mécanismes de dégradation » et « Triplet Zone/Mécanisme/Effet ». Elle traduit le fait qu'un mécanisme de dégradation de la liste de référence correspond à 0 ou plusieurs triplets (0,n) et qu'un triplet correspond à un et à un seul mécanisme (1,1). En effet, par définition un triplet correspond à une zone donnée et à un mécanisme donné.
- La relation « **Concerne** » lie les entités « Liste de référence des modes ou effets du vieillissement » et « Triplet Zone/Mécanisme/Effet ». Elle traduit le fait qu'un effet du vieillissement de la liste de référence correspond à 0 ou plusieurs triplets (0,n) et qu'un triplet correspond à 0 ou au plus un effet du vieillissement (0,1). En effet, un triplet est nécessairement lié à une zone et à un mécanisme, mais l'effet du vieillissement n'est pas toujours identifié, c'est pour cela qu'un triplet peut n'être lié à aucun effet du vieillissement.
- La relation « **Engendre** » lie les entités « Triplet Zone/Mécanisme/Effet » et « Conséquence ». Elle indique qu'un triplet peut engendrer 0 ou plusieurs conséquences (0,n). En effet, les conséquences ne sont pas identifiées pour tous les triplets, mais seulement pour les triplets critiques. Une conséquence correspond à au moins un ou plusieurs triplets (1,n).
- La relation « **A comme solution** » lie les entités « Triplet Zone/Mécanisme/Effet » et « Parade ». Cette relation indique qu'un triplet peut avoir 0 ou plusieurs parades (0,n). Comme pour les conséquences, les parades sont identifiées uniquement pour les triplets critiques. Une parade peut constituer une solution à au moins un ou plusieurs triplets.

Pour construire ce modèle conceptuel de données, illustré dans la figure 6.3, nous avons utilisé le logiciel PowerAMC, recommandé par un professeur spécialiste dans les systèmes d'information. Ce logiciel permet de créer à partir du modèle conceptuel, la base de données correspondante.

### 6.3.2 Création d'une base de données (maquette)

L'objectif dans ce travail est de donner une maquette démonstrative et non un système industriel opérationnel en l'état. En effet, la mise en œuvre d'un tel système nécessite la participation de spécialistes en informatique pour assurer tous les aspects fonctionnels : assurer et contrôler les accès en consultation et en modification aux données, et développer des interfaces ergonomiques pour les utilisateurs en vue de la saisie, la modification et la recherche d'informations.

La création de la base de données a été faite avec le logiciel Microsoft Access. La large diffusion de ce logiciel a été la principale raison de ce choix.

Pour assurer le fonctionnement de la base de données, cinq actions sont nécessaires :

**1- La création de la base** : ceci consiste en la création des tables correspondant aux entités et aux relations du modèle. Pour chaque table il y a un ensemble d'attributs regroupant l'ensemble des données caractérisant une entité ou une relation. Pour chaque champ, on doit préciser la nature des données qu'il contient (un nombre, un ensemble de caractères, un lien vers un document donné, ...). Grâce à PowerAMC, cette création se fait de manière automatique à partir du modèle conceptuel de données (voir figure 6.4).

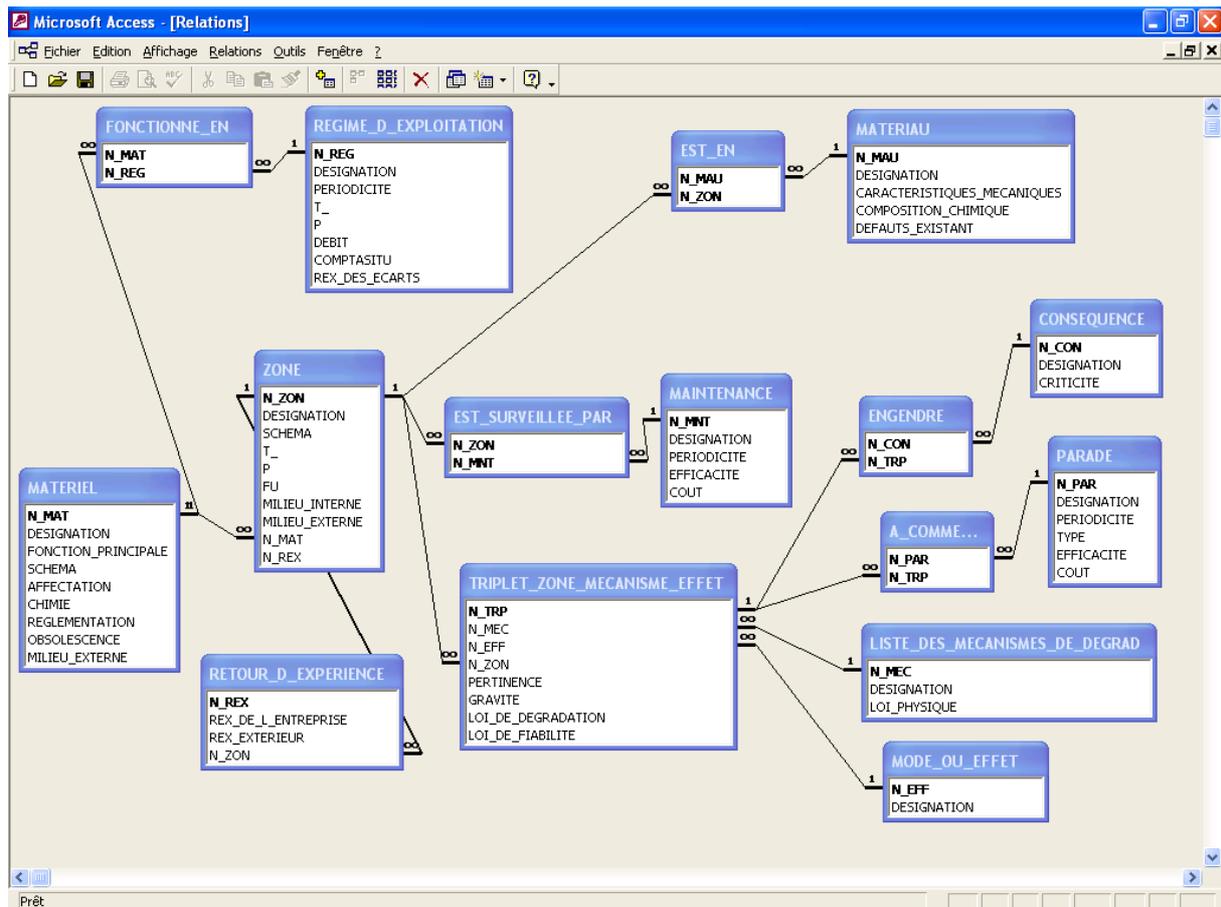


Figure 6.4 : Les tables relationnelles de la base de données de vieillissement (réalisé sous Microsoft Access).

2- La création des interfaces de saisie et de modification des données : pour permettre aux utilisateurs de saisir ou de modifier les données, il faut créer des interfaces ergonomiques.

3- L'identification des différentes utilisations de la base de données : il est nécessaire de définir les différentes utilisations possibles de la base de données de vieillissement. Le paragraphe 6.3.3 ci-après est consacré à la présentation de ces utilisations possibles.

4- La création des interfaces de recherche d'information : pour concrétiser les différentes utilisations de la base, des interfaces de recherche d'informations doivent être créées.

5- La création des requêtes : chaque demande de recherche d'informations doit être traduite en une requête multicritères qu'on soumet à la base de données pour retrouver l'information demandée.

### 6.3.3 Différentes utilisations possibles de la base de données de vieillissement

On peut imaginer plusieurs formes d'utilisations possibles pour cette base de vieillissement.

Nous précisons ci-dessous les utilisations les plus courantes, structurées en quatre types :

#### **1- Recherche d'informations concernant un matériel donné**

Pour un matériel donné, il est possible d'accéder à l'ensemble des informations qui le concernent, comme le retour d'expérience, les mécanismes de dégradation qui l'affectent ou plus précisément ses triplets Zone/Mécanisme/Effet.

#### **2- Recherche d'informations concernant un mécanisme de dégradation donné**

Pour un mécanisme de dégradation donné, il est possible d'avoir la liste des matériels qu'il peut potentiellement affecter ou qu'il a effectivement affectés, ou encore la liste des paramètres ou l'association de paramètres pour lesquels ce mécanisme est jugé potentiel (les matériaux, les paramètres d'exploitation : la température, la pression T, P, ..., le milieu chimique,...). Il est aussi possible de consulter l'ensemble des parades proposées pour éviter ou ralentir l'apparition de ce mécanisme.

#### **3- Recherche d'informations concernant un mode ou un effet du vieillissement donné**

De même que pour un mécanisme de dégradation, on peut avoir pour un effet du vieillissement, les matériels qu'il peut ou qu'il a effectivement affectés, les paramètres pour lesquels il est jugé potentiel, les conséquences qu'il peut provoquer et les parades proposées. On peut aussi déterminer l'ensemble des mécanismes de dégradation qui peuvent être à l'origine de cet effet.

#### **4- Recherche d'informations concernant des matériels analogues à un matériel donné**

Si plusieurs matériels sont répertoriés dans la base de données, il est possible de procéder à des recherches d'informations concernant des matériels analogues. La recherche de ces matériels analogues, peut s'effectuer par rapport à un ou plusieurs critères : un matériau, par exemple, ou un matériau évoluant dans un milieu chimique donné.

Une fois ces matériels analogues identifiés, il est alors possible d'accéder à l'ensemble des informations qui les concernent :

- le retour d'expérience,
- les triplets potentiels ou avérés,
- les parades proposées ou mise en œuvre pour ces triplets,
- la maintenance préventive
- ...

## **Conclusion**

Dans une première partie correspondant à une brève étude bibliographique sur la gestion des connaissances, nous mettons en évidence les différents aspects à considérer lors d'une démarche de capitalisation des connaissances. En effet, il est important de capitaliser les informations utilisées et produites suite à une application de la démarche d'anticipation. Ces informations peuvent être utilisées ultérieurement dans les études technico-économiques de gestion de cycle de vie, notamment pour apprécier le vieillissement physique des installations.

Une deuxième partie présente une des rares bases de vieillissement actuellement existantes, la base GALL, Generic Aging Lessons Learned. Une analyse du contenu de cette base, faite par Lannoy et Proccacia [Lannoy et Proccacia, 2005] permet d'identifier les principales informations que doit contenir une base de vieillissement.

Cette analyse, bien que moins ambitieuse, confirme la liste, issue de la démarche d'anticipation, des informations à capitalisées. Afin de faciliter la saisie des données, nous proposons d'associer à chaque phase de la démarche, pour un matériel donné et pour une application donnée de la démarche à ce matériel, les différents documents produits au cours de cette application.

Un modèle conceptuel de données a été proposé pour la structuration des résultats à capitaliser. Ce modèle permet une exploitation optimale des résultats de l'anticipation. Nous avons finalement recensé les différentes utilisations possibles de la base de données de vieillissement générée par ce modèle.



## Chapitre 7

---

### Validation de la démarche d'anticipation, application à un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur

---

C'est en collaboration avec EDF-R&D que cette application de la démarche a été réalisée. Le Parc nucléaire français comprend 58 tranches nucléaires REP (Réacteur à Eau Pressurisée) réparties sur 19 sites. Elles sont réparties comme suit :

- 34 tranches de 900 MWe,
- 20 tranches de 1300 MWe,
- et 4 tranches de 1450 MWe.

La tranche la plus vieille se situe à Fessenheim, elle a été mise en service en 1977. La mise en service des deux premières tranches de 1300 MW, à Paluel, date de 1985 et la tranche la plus récente se situe à Civaux. Elle a été mise en service en 1999.

Comme on peut le constater grâce à ces chiffres, les tranches de 900 MWe approchent de la période de fin d'exploitation fixée à 40 ans lors de la conception. L'application de la démarche d'anticipation est donc adaptée à ces tranches pour lesquelles il faut anticiper les problèmes liés au vieillissement et à l'éventuelle prolongation de la durée d'exploitation de 40 à 60 ans.

Un premier paragraphe donne les critères ayant guidé le choix du matériel pour cette application. Il s'agit du pressuriseur. Ce matériel est décrit dans un deuxième paragraphe. Nous présentons ensuite la mise en œuvre des différentes phases de la démarche d'anticipation, notamment les 4 étapes du processus d'anticipation qui ont été réalisées dans le cadre de deux réunions collectives. Enfin, un dernier paragraphe est consacré à la validation de la démarche d'anticipation. Cette validation est étudiée en trois points : l'évaluation de la mise en œuvre, l'évaluation des résultats et la généralité de la démarche d'anticipation.

## 7.1 Choix du matériel pour l'application de la démarche

Pour l'application de la démarche d'anticipation, le matériel a été choisi à partir d'un certain nombre de critères :

### ▪ Critères importants pour assurer la richesse du cas d'étude

Il s'agit ici des principaux critères de choix, ils permettent de garantir, a priori, une richesse de l'application :

- un matériel passif critique du point de vue de la sûreté, de la disponibilité et des coûts. En effet, c'est pour ce type de matériel qu'on justifie l'application de la démarche qui implique un investissement de la part de l'analyste et des experts. Cet investissement doit alors être justifié par les enjeux que représente le matériel retenu.

- un matériel qui présente des problématiques significatives pour l'anticipation. Ceci va permettre l'application de toutes les étapes du processus d'anticipation, en particulier celle de recherche de paradoxes pour les mécanismes de dégradation critiques.

- un matériel qui donne la possibilité d'interroger un nombre significatif d'experts. La diversité des experts est essentielle pour l'application de la démarche. Un nombre significatif d'experts est un facteur important pour la réussite de l'application (4 au minimum selon [Cooke et Goossens, 2000]).

- un matériel qui dispose de données de fiabilité établies sur le long terme par une étude précédente moins structurée réalisée à EDF. Ce critère est intéressant puisqu'il permet à la fin de l'application, d'évaluer l'apport de la démarche par rapport aux pratiques existantes qui s'appuient principalement sur les compétences de l'analyste.

- un matériel pour lequel on peut trouver des matériels analogues présentant potentiellement des problématiques d'anticipation similaires.

- un matériel disposant d'un retour d'expérience étranger.

### ▪ Critères permettant de faciliter l'étude et de gagner du temps par rapport à la recherche des informations transcrites

Ces critères ne sont pas importants dans la validation de la démarche, dans sa structure et ses résultats, mais ils permettent de faciliter l'application en assurant un gain de temps précieux dans le cadre d'un travail de thèse. Ces deux critères sont :

- un matériel bien connu des encadrants EDF de la thèse.

- un accès facile aux données transcrites existantes.

Le pressuriseur est un matériel qui répond à l'ensemble de ces critères ; nous le décrivons dans le paragraphe qui suit.

## 7.2 Description du matériel choisi : le pressuriseur

Il existe deux types de pressuriseur dans les centrales nucléaires françaises le PR 40 et le PR 60

- PR 40 : Paliers FESSENHEIM, BUGEY et CPY
- PR 60 : Paliers PQY (P4 et P'4) et N4

Nous proposons d'étudier dans cette application les pressuriseurs des centrales nucléaires 900 MWe qui sont les plus vieilles (il s'agit de 34 pressuriseurs correspondant aux 34 tranches 900 MWe voir l'annexe 4).

Le pressuriseur est situé sur une branche chaude du circuit primaire principal (CPP) d'une tranche nucléaire (voir figure 7.1). Ses fonctions sont les suivantes [Amblard et Prat, 1998] :

- 1- Eviter la vaporisation dans le cœur :
  - par contrôle de la pression du circuit primaire (CP) : le pressuriseur maintient la pression à 155 bars,
  - en protégeant le CP contre les dépressurisations.
- 2- Protéger le CP contre les surpressions
- 3- Reprendre les variations de volume du fluide primaire.

Le contrôle de la pression se fait par :

- **Chauffage** , assuré par des cannes chauffantes,
- **Refroidissement** assuré par aspersion d'eau issue de la branche froide.

La ligne d'expansion du pressuriseur (LEP) assure la liaison permanente entre le pressuriseur et le CPP.

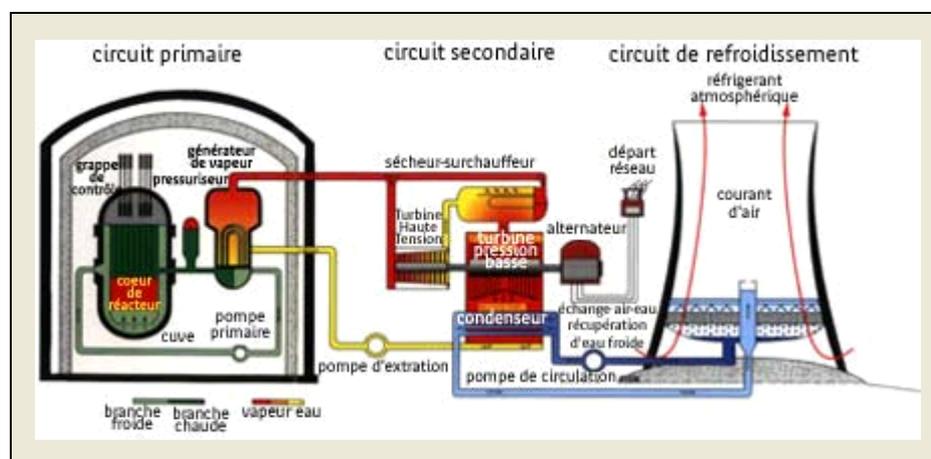


Figure 7.1 : Situation du pressuriseur dans le schéma d'une tranche nucléaire REP.

## 7.3 Application de la démarche d'anticipation au pressuriseur

Ce paragraphe présente l'application des différentes phases de la démarche AVISE au pressuriseur ainsi que les différents résultats obtenus.

### 7.3.1 Phase 1 : Définition du contexte et des objectifs de la démarche d'anticipation

Il est important dans cette phase 1 de préciser les limites de l'application. Dans notre cas, il s'agit du pressuriseur et de sa ligne d'expansion (jusqu'au piquage branche chaude inclus) pour les tranches nucléaires 900 MWe. Le piquage et la buse d'aspersion rentrent dans le cadre de l'application, le reste du circuit d'aspersion est exclus. Les cannes chauffantes qui se trouvent à l'intérieur du pressuriseur sont également écartées de l'étude. En effet, il s'agit de composants consommables dont la défaillance ne remet pas en cause la durée d'exploitation du pressuriseur. Les soupapes de sûreté et le circuit associé sont aussi exclus de l'étude (voir le schéma technique du pressuriseur en annexe 4.1).

Cette démarche, qui rentre dans le cadre de la gestion du cycle de vie des installations, est ici appliquée dans un contexte industriel particulier. Il s'agit d'une étude de durabilité qui vise à évaluer la possibilité de prolonger la durée d'exploitation des tranches nucléaires REP de 40 à 60 ans.

Les objectifs de cette application sont donc :

- l'identification des mécanismes de dégradation potentiels qui peuvent affecter une ou plusieurs zones du pressuriseur et de sa ligne d'expansion.
- l'étude de la pertinence de ces mécanismes à 60 ans d'exploitation.
- l'analyse des conséquences de ces mécanismes (identification des modes ou effets du vieillissement) et de leur gravité en termes de sûreté, de disponibilité, de coûts, de dosimétrie et d'image.
- l'identification et l'évaluation des parades potentielles à mettre en œuvre pour les zones jugées critiques.

Un document, intitulé « Document 1 : Présentation de la démarche d'anticipation, son contexte et ses objectifs », destiné aux experts regroupe ces informations : limites, contexte et objectifs de l'application. Il présente aussi les principales étapes à suivre lors de cette application, les outils ou méthodes à mettre en œuvre et les compétences des experts à interroger (voir annexe 3).

### 7.3.2 Phase 2 : Identification et collecte de l'information nécessaire pour l'anticipation

Nous avons collecté lors de cette phase l'ensemble des informations concernant le pressuriseur, informations décrites dans le chapitre 2 (voir paragraphe 2.4.2, figure 2.6).

Nous indiquons dans le tableau 7.1 qui suit, les documents utilisés suivant le type de données recherchées. Ceci peut constituer un guide permettant de localiser ces données au sein EDF et qui peut faciliter cette phase pour des applications ultérieures :

**Tableau 7.1 : Les sources d'informations nécessaires à l'anticipation chez EDF.**

Type de données	Source d'information
<b>Les données de conception</b>	- Documents de conception –Framatome
- Les différents types de pressuriseurs	- Documents du projet « Durée de vie »
- Les schémas techniques	- Doctrine de maintenance (données de conception et

<ul style="list-style-type: none"> <li>- la liste et l'affectation des matériels dans les différentes tranches</li> <li>- Les données géométriques à froid</li> <li>- Les composants</li> <li>- Les données de conception et les principales évolutions</li> <li>- Les données de fabrication et les principales évolutions</li> <li>- Les coûts de remplacement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>de fabrication, évolutions)</li> <li>- Etude de faisabilité de remplacement (si elle existe), (les coûts de remplacement)</li> </ul>
<p><b>Les données relatives aux matériaux</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les matériaux par composant</li> <li>- Les caractéristiques mécaniques et chimiques des matériaux</li> <li>- Les soudures et les caractéristiques des principales opérations de soudage et de revêtement</li> <li>- La classification de la qualité de fabrication des soudures des matériels en exploitation (REX)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tranches nucléaires REP : matériels et matériaux, EDF, Direction de l'équipement, Mai, 1989.</li> <li>- Doctrine de maintenance (opérations de soudage, REX de la qualité des soudures en exploitation)</li> </ul>
<p><b>Les données fonctionnelles</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les fonctions</li> <li>- Le découpage fonctionnel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dossiers techniques</li> <li>- Découpage OMF</li> </ul>
<p><b>Les paramètres de fonctionnement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La pression nominale Pn</li> <li>- La température nominale</li> <li>- Le volume d'eau à Pn</li> <li>- Le volume vapeur à Pn</li> <li>- Le débit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dossiers techniques</li> </ul>
<p><b>Les données d'environnement interne ou externe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La situation et l'emplacement dans la tranche</li> <li>- Les matériels environnants</li> <li>- Le milieu chimique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dossiers techniques (emplacement dans la tranche, matériels environnants)</li> <li>- [Stutzmann, 1997] A. Stutzmann, <i>Spécifications chimiques centrales REP</i>, EDF, ref. D.5001/NRN/R84 442-Ind. 2, avril, 1997. (milieu chimique)</li> </ul>
<p><b>Les données d'exploitation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les différents régimes d'exploitation du matériel : les transitoires d'exploitation</li> <li>- La comptabilisation des situations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Notice technique sur les centrales nucléaires P.W.R (exemple pour le pressuriseur Fascicule N° 325), (régimes d'exploitation)</li> <li>- [Pot, 2002] J. Pot, <i>Comptabilisation des Situations REP 900 MWe : Analyse de la consommation des situations</i>, ref. 02/0546, 2002.</li> </ul>
<p><b>Les données de maintenance</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La doctrine de maintenance</li> <li>- La surveillance en exploitation</li> <li>- La maintenance opérationnelle</li> <li>- Le remplacement</li> <li>- L'obsolescence</li> <li>- Les différents coûts de maintenance</li> <li>- La réglementation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Doctrine de maintenance</li> <li>- Etude de faisabilité de remplacement (si elle existe)</li> <li>- l'arrêté d'exploitation le plus récent (actuellement celui du 11/10/99), (réglementation)</li> </ul>
<p><b>Les données de retour d'expérience</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le retour d'expérience EDF</li> <li>- Le retour d'expérience étranger</li> <li>- Le retour d'expérience analogue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- REX SAPHIR</li> </ul>
<p><b>Les données de fiabilité</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les facteurs d'usage</li> <li>- Les mécanismes de dégradation avérés ou potentiels</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etudes OMF</li> <li>- Document des projets « Durée de vie » et « Durabilité »</li> <li>- GALL (mécanismes de dégradation potentiels)</li> </ul>

L'ensemble des informations collectées est regroupé dans un document intitulé « Document 2 : Informations pour l'anticipation » (voir annexe 4). Pour une description de la structure du document voir paragraphe 2.4.2, phase 2).

Les documents 1 et 2 sont communiqués aux experts qui ont accepté de participer à l'étude et ceci avant la phase 3 du processus d'anticipation.

### **7.3.3 Phase 3 : Processus d'anticipation**

Dans cette phase 3, nous avons appliqué les différentes étapes du processus d'anticipation. Pour cela, plusieurs experts ont été sollicités afin de participer à différents niveaux du processus. Deux réunions collectives ont été organisées dans le cadre de cette application. Ainsi, pour chaque réunion, nous avons appliqué le processus générique d'interrogation d'experts identifié au chapitre 3 (voir paragraphe 3.4.1, figure 3.4). L'étape 1 a été réalisée dans une première réunion. Les étapes 2, 3 et 4, ont été réalisées lors d'une seconde réunion.

#### **7.3.3.1 Etape 1 : Identification des mécanismes de dégradation potentiels**

Pour l'application de cette étape 1, nous avons mis en œuvre la méthode STIMEX-IMDP de stimulation d'expert pour l'identification des mécanismes de dégradation potentiels dans le cadre d'une réunion collective, tout en respectant le processus d'interrogation d'experts donné ci-dessous en six points.

##### **1- Réunion 1 : définition des objectifs de l'élicitation**

Pour ne pas trop surcharger les experts, la durée de la réunion a été fixée à une demi-journée.

En fonction du temps disponible, quatre objectifs ont été fixés pour cette réunion :

- compléter, si nécessaire, les listes de référence des mécanismes de dégradation et des modes ou effets du vieillissement,
- identifier les mécanismes de dégradation potentiels pour le pressuriseur et sa ligne d'expansion,
- associer ces mécanismes à des zones particulières du matériel,
- associer aux couples Zone/Mécanisme, les modes ou effets du vieillissement potentiel.

Ce dernier point n'était pas prévu à cette étape du processus d'anticipation, mais il a été inclus, afin d'optimiser la réunion collective et de profiter de la présence de l'ensemble des experts, qu'il n'est pas facile de réunir.

##### **2- Réunion 1 : choix des experts**

Six experts pluridisciplinaires, ont accepté de participer à la réunion :

- 1- un expert en mécanismes de dégradation (corrosion en milieu primaire),
- 2- un expert du comportement mécanique et de la durée de vie des matériels soumis à la fatigue,
- 3- un expert en mécanismes de dégradation, fiabilité et retour d'expérience,
- 4- un expert en maintenance (maîtrise du vieillissement et durée de vie) et matériaux,
- 5- un expert en chimie,
- 6- un expert en conception et ingénierie du pressuriseur.

L'expert 1 peut apporter une expertise pointue sur l'anticipation par rapport au mécanismes de dégradation. Les experts 2, 3 et 4 peuvent apporter des expertises plus globales en terme de durée d'exploitation. Les experts 5 et 6 sont ceux qui connaissent le plus le matériel, ses conditions d'exploitation et son retour d'expérience.

### 3- Réunion 1 : préparation du questionnaire

Un questionnaire a été établi selon la méthode STIMEX-IMDP (voir le tableau 7.2 ci-dessous)

**Tableau 7.2 : Questionnaire pour la première réunion dans le cadre de l'application de la démarche d'anticipation au pressuriseur et sa LEP.**

Documents à présenter	Questions	Type de réponse et supports
- Les schémas techniques	Quels sont, selon vous, les mécanismes de dégradations et les modes de défaillance qui sont potentiels pour le pressuriseur et sa ligne d'expansion ?	Réponses individuelles sur « post-it »
- Présenter les listes de référence des mécanismes de dégradation et des modes ou effets du vieillissement complétées par les experts	<b>Filtre 1</b> : Sans fournir de justification, éliminer de la liste les mécanismes et les modes complètement aberrants pour le pressuriseur et sa LEP	Réponses individuelles sur « post-it »
- Présentation des résultats du filtre 1, en donnant tous les mécanismes et effets retenus par tous les experts (sur « post-it »)	- Validation des résultats du filtre 1	Discussion
- Présenter les matériaux et le REX analogue - Signaler qu'on a à disposition les caractéristiques mécaniques et chimiques des matériaux.	<b>Filtre 2</b> : Pour ces matériaux, éliminer les mécanismes et les modes ou effets du vieillissement non potentiels.	Réponses individuelles sur « post-it »
- Présentation des résultats du filtre 2, en donnant tous les mécanismes et effets retenus par tous les experts (éliminer les « post-it » inutiles)	- Validation des résultats du filtre 2	Discussion
- Présenter les conditions d'exploitation et les spécifications chimiques : T, P, milieu chimique - Présenter le REX des écarts et des erreurs humaines	<b>Filtre 3</b> : En tenant compte des conditions d'exploitation, éliminer les mécanismes et les modes ou effets du vieillissement non potentiels.	Réponses individuelles sur « post-it »
- Présenter les différentes zones et soudures du pressuriseur et quelques schémas de zones particulières - Présenter la classification de la qualité de fabrication des soudures des pressuriseurs en exploitation (REX) - Présentation des résultats du filtre 3, en donnant tous les mécanismes et effets retenus par tous les experts (éliminer les « post-it » inutiles)	- Validation des résultats du filtre 3 - Pour les mécanismes retenus, identifier les zones concernées par ces mécanismes et modes ou effets du vieillissement.	Discussion

### 4- Réunion 1 : élicitation

Pour l'élicitation, nous présentons ci-dessous, les participants, le lieu, la date et la durée, ainsi que le déroulement de la réunion.

#### Les participants

Plusieurs acteurs sont intervenus dans cette réunion :

- Les six experts
- Un animateur et un coordinateur pour présenter les différents documents
- Deux rapporteurs, pour observer et noter le déroulement de la réunion .

#### Lieu, date et durée

La réunion a eu lieu sur le site d'EDF à Saint-Denis, le 28/04/2004 de 9h30 à 13h.



d- Bilan de la réunion

- La liste de référence des mécanismes de dégradation a été enrichie par trois mécanismes : corrosion sous hydrogène, fragilisation sous hydrogène, fatigue endurance.
- La liste de référence des modes ou effets du vieillissement a été enrichie par un effet du vieillissement : le faïençage.
- 42 triplets Zone/Mécanisme/Modes ou effets du vieillissement ont été identifiés et validés par l'ensemble des experts. Le tableau 7.3 ci-dessous présente sur chaque ligne : la zone, le mécanisme de dégradation, le mode ou effet du vieillissement et un possible enchaînement de causes. Par exemple, l'apparition du triplet 3 peut entraîner celle des triplets 4 et 5.

**Tableau 7.3 : Triplets Zone/Mécanisme/Modes ou effets du vieillissement potentiels pour le pressuriseur et sa LEP.**

N°	Zone	Mécanisme de dégradation	Mode de ruine ou effet du vieillissement	enchaînement de causes
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	Perte d'épaisseur	
2	Ensemble de l'enveloppe externe	Fatigue mécanique	Fissuration	
3	Ensemble de l'enveloppe externe	Vieillissement thermique	Perte de caractéristiques des matériaux, réduction de la résistance à la rupture	4, 5
4	Ensemble de l'enveloppe externe	Vieillissement thermique	Déchirure ductile (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)	
5	Ensemble de l'enveloppe externe	Vieillissement thermique	Rupture brutale (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)	
6	Ensemble de l'enveloppe externe décalorifugée	Corrosion Atmosphérique	Perte d'épaisseur	
7	Enveloppe interne (revêtement inox)	Corrosion par piqûres	Perte de matière : apparition de petits cratères, Percement	8, 12, 13
8	Enveloppe interne (Mécanisme actif dans les phases d'arrêt)	Corrosion par piqûres	Fissuration	
9	Enveloppe interne (revêtement inox)	Usure par corps migrants	Arrachement	
10	Enveloppe interne (surtout à l'interface liquide-vapeur)	Fatigue à grand nombre de cycles	Faïençage	
11	Enveloppe interne (zone de variation de l'interface liquide -vapeur)	Corrosion due à un milieu biphasique	Fissuration, piqûres	
12	16MND5 (si percement préalable du revêtement)	CSC	Fissuration	
13	16MND5 (si percement préalable du revêtement)	Fragilisation sous H2	Rupture brutale	
14	Ensemble des zones en inox écroui dont dureté HV > 300	CSC	Fissuration	
15	Ensemble des zones en inox (Mécanisme actif dans les phases d'arrêt.)	Corrosion inter-cristalline	Fissuration	

16	Zone entre manchettes et cannes chauffantes	Corrosion cavernuse (en zones confinées)	Perte de matériau	17
17	Zone entre manchettes et cannes chauffantes	Corrosion cavernuse (en zones confinées)	Fissuration	
18	Zone entre cannes chauffantes et plaques de maintien	Corrosion cavernuse (en zones confinées)	Perte de matériau	19
19	Zone entre cannes chauffantes et plaques de maintien	Corrosion cavernuse (en zones confinées)	Fissuration	
20	LBM	Corrosion Atmosphérique	Fissuration	
21	Manchettes thermiques	Fatigue corrosion	Fissuration	
22	Manchettes de cannes chauffantes	Fatigue corrosion	Fissuration	
24	Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion	Fatigue thermique	fissuration	
25	Zones où arrive un fluide de température différente	Fatigue thermique	Fissuration	
26	Tous les piquages	Fatigue mécanique	Fissuration	
27	Piquages inox	Fatigue thermique	Fissuration	
28	Piquages inox	CSC	Fissuration	
29	Piquages (tout ce qui est en 16MND5)	Vieillessement thermique	Perte de caractéristiques des matériaux, réduction de la résistance à la rupture	30, 31
30	Piquages (tout ce qui est en 16MND5)	Vieillessement thermique	Déchirure ductile (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)	
31	Piquages (tout ce qui est en 16MND5)	Vieillessement thermique	Rupture brutale (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)	
32	Piquage branche chaude	Fatigue à grand nombre de cycles	Faïençage	
33	Goujons	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	perte de matériaux	34
34	Goujons (suite à fuite d'acide borique)	CSC	Fissuration	
35	Goujons	Relaxation précontrainte	Perte de caractéristiques des matériaux	
36	Boulons, joints, filetages	Matage	Perte d'étanchéité	
37	Boulons	Relaxation précontrainte	Desserrage	
38	Buse d'aspersion	Erosion	Perte de matériaux	
39	Trou d'homme	Grippage	Blocage	
40	Trou d'homme	Vieillessement	Perte des caractéristiques des joints, fuite	
41	LEP	Fatigue corrosion	Fissuration	
42	Zone sans pente de la LEP	Stratification thermique	Faïençage	

- Un certain nombre de situations accidentelles pouvant accélérer le vieillissement ont été aussi identifiées (voir le tableau 7.4), cependant elles ne seront pas prises en compte dans la suite de cette étude d'anticipation. Bien qu'elles contribuent au vieillissement, elles ne correspondant pas à une dégradation continue et progressive au cours du fonctionnement, due à un phénomène de vieillissement.

**Tableau 7.4 : Situations accidentelles pour le pressuriseur et sa LEP.**

<b>Zone</b>	<b>Situation accidentelle</b>
Jupe support	Séisme
Pressuriseur (phase vapeur)	Explosion
Totalité du pressuriseur + LEP	Agressions externes : chutes d'avions
Totalité du pressuriseur + LEP	Agressions internes : explosion d'une pompe
Manchette de cannes chauffantes	Amorçage électrique, conduisant à échauffement
Plaques de maintien	Echauffement, conduisant à fissuration

#### e- Annonce des prochaines étapes

- 1- Pertinence des mécanismes à 60 ans.
- 2- Gravité des mécanismes et hiérarchisation (en termes de sûreté, de disponibilité, ...).
- 3- Solutions de maintenance (efficacité des inspections, nouvelles solutions,..)

#### f- Commentaires des experts participants sur la méthode et sa mise en œuvre

- L'aspect pluridisciplinaire a été très apprécié par les experts. Il est jugé important et nécessaire.
- La méthode a été jugée efficace par rapport aux dégradations à long terme et aux dégradations accidentelles.
- La méthode a été jugée exhaustive, grâce à l'utilisation de listes de référence, permettant d'éviter les oublis.
- Les experts se sont déclarés motivés pour poursuivre l'application.

#### **5- Réunion 1 : agrégation des résultats**

Après la première question, les mécanismes de dégradation et les effets du vieillissement donnés par les experts et qui ne sont pas dans les listes de références sont intégrés à ces dernières. C'est à partir de ces listes complétées que sont appliqués les différents filtres. A la fin de chaque filtre, tous les mécanismes et effets retenus par au moins un expert sont présentés à l'ensemble des participants qui valident la liste suite à une discussion. Les résultats sont obtenus par un consensus entre tous les experts.

#### **6- Réunion 1 : synthèse et capitalisation**

Suite à la réunion, un compte rendu résumant l'ensemble des résultats a été envoyé aux experts.

#### **7.3.3.2 Etape 2 : Etude de la pertinence des mécanismes identifiés à 60 ans d'exploitation**

Afin de mettre en œuvre cette étape 2, nous avons préconisé l'utilisation d'un outil graphique de modélisation des connaissances : les réseaux bayésiens. La construction des réseaux bayésiens correspondant à tous les mécanismes potentiels pour le pressuriseur et sa LEP n'était cependant pas envisageable dans le cadre de ce travail de recherche. Un mécanisme de dégradation a toutefois été traité par réseau bayésien dans le chapitre 5 afin d'illustrer l'intérêt de cet outil, il s'agit de la fatigue thermique (voir paragraphe 5.2).

Afin de réaliser cette étape, nous proposons alors de quantifier la pertinence des mécanismes de dégradation par expertise. Nous définissons pour cela deux paramètres connus des experts, pour caractériser cette pertinence :

- la probabilité d'amorçage des mécanismes de dégradation potentiels pendant les 60 ans d'exploitation,
- la cinétique d'évolution des mécanismes de dégradation potentiels.

Pour chaque couple Zone/Mécanisme de dégradation, on peut alors évaluer la pertinence, selon chaque expert, grâce à la matrice ci-dessous (voir figure 7.3). Cette matrice a été construite selon le modèle des matrices utilisées dans la méthode AMDE.

Probabilité d'amorçage	Cinétique de dégradation		
	Lente	Moyenne	Rapide
Importante	2	3	3
Moyenne	1	2	3
Faible	1	1	2

Pertinence  
1 : Faible  
2 : Moyenne  
3 : Importante

**Figure 7.3 : Matrice de pertinence en fonction de la probabilité d'amorçage et de la cinétique de dégradation.**

Cette étape 2 a été réalisée dans le cadre d'une réunion collective, décrite ci-après (voir paragraphe 7.3.3.4, réunion 2).

### 7.3.3.3 Etape 3 : Analyse et hiérarchisation des mécanismes de dégradation

Pour cette étape 3, trois objectifs sont fixés dans la démarche :

- 1- L'identification des modes ou effets du vieillissement. Elle a été réalisée lors de la première réunion collective d'experts.
- 2- L'évaluation de la gravité des mécanismes de dégradations potentiels en termes de sûreté, d'indisponibilité, de coûts, de dosimétrie et d'image médiatique.
- 3- La hiérarchisation des triplets. Pour obtenir cette hiérarchisation, nous proposons de déterminer pour chaque couple Zone/Mécanisme de dégradation potentiel une criticité en fonction de la pertinence et de la gravité.

Nous déterminons la criticité d'un triplet en fonction des deux paramètres : pertinence et gravité. Pour cela, nous avons construit une matrice, donnée en figure 7.4, selon le modèle AMDE. Après l'évaluation pour chaque couple zone/ mécanisme de la pertinence et de la gravité, nous pouvons alors déterminer la criticité grâce à cette matrice. Nous considérons que la criticité du couple zone/mécanisme correspond à celle du triplet correspondant Zone/Mécanisme/Mode ou effet du vieillissement.

Cette étape 3 a été réalisée lors de la même réunion collective que l'étape 2, cette réunion est décrite ci-après.

Pertinence	Gravité		
	Faible	Moyenne	Importante
Importante	2	3	3
Moyenne	1	2	3
Faible	1	1	2

Criticité de la défaillance

3 : Faible

2 : Moyenne

1 : Importante

**Figure 7.4 : Matrice de criticité en fonction de la pertinence et de la gravité.**

### 7.3.3.4 Etape 4 : Identification et évaluation des parades potentielles

Pour l'application de cette étape 4, la méthode 2 de stimulation d'expert a été mise en œuvre dans le cadre d'une réunion collective, les étapes 2 et 3 ont été aussi réalisées dans le cadre de cette réunion que nous décrivons ci-dessous selon les 6 points du processus d'interrogation d'experts.

#### 1- Réunion 2 : définition des objectifs de l'élucation

Deux objectifs sont définis pour cette deuxième réunion :

- **la hiérarchisation des triplets « Zone/Mécanisme de dégradation/Mode ou effet du vieillissement » potentiels identifiés lors de la première réunion selon leur criticité par évaluation de leur pertinence et de leur gravité,**

- l'identification des actions d'anticipation prioritaires permettant d'exploiter un pressuriseur pendant 60 ans (c'est-à-dire 20 ans au-delà des 40 ans prévus à la conception).

#### 2- Réunion 2 : choix des experts

Quatre experts ayant participé à la réunion 1 ont accepté de participer à cette deuxième réunion :

1- un expert en mécanismes de dégradation (corrosion en milieu primaire),

2- un expert du comportement mécanique et de la durée de vie des matériels soumis à la fatigue,

3- un expert en mécanismes de dégradation, en fiabilité et en retour d'expérience,

4- un expert en maintenance (maîtrise du vieillissement et durée de vie) et en matériaux,

- Deux autres experts en maintenance ont participé à la réunion 2 : le premier est plus focalisé sur les méthodes d'inspection et les contrôles non destructifs, le second plus sur la mise en œuvre de techniques de maintenance avancées. Ces experts, orientés recherche et développement, correspondent bien aux besoins de la réunion puisqu'il s'agit d'identifier des parades potentielles.

#### 3- Réunion 2 : préparation du questionnaire

##### a- Evaluation de la pertinence

La pertinence est renseignée au moyen d'un tableau. Un exemple est donné ci-dessous dans le tableau 7.5. Pour chaque couple Zone/Mécanisme, l'expert devra indiquer si :

- la probabilité d'amorçage à 60 ans est : 1 - faible, 2 - moyenne ou 3 - importante,

- la cinétique est : 1 - lente, 2 - moyenne ou 3 - rapide

Si l'expert n'a pas de réponse, la case est laissée vide.

**Tableau 7.5 : Evaluation de la pertinence des couples Zone/Mécanisme de dégradation.**

N°	Zone	Mécanisme de dégradation	Probabilité d'amorçage à 60 ans	Cinétique
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré		

**b- Evaluation de la gravité**

Nous proposons aux experts de quantifier cette gravité pour chaque couple Zone/Mécanisme de dégradation potentiel au moyen d'un tableau, un exemple est donné ci-dessous dans le tableau 7.6. Pour chaque case, l'expert devra indiquer si la gravité est 1 - faible, 2 - moyenne ou 3 - importante. Si l'expert n'a pas de réponse, la case est laissée vide.

**Tableau 7.6 : Evaluation de la gravité des couples Zone/Mécanisme de dégradation.**

N°	Zone	Mécanisme de dégradation	Sûreté	Disponibilité	Coûts	Dosimétrie	Image
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré					

**c- Evaluation de la maintenance et identification des parades potentielles**

Pour ce point, un questionnaire a été établi selon la méthode STIMEX-IPP, il est structuré comme suit, pour chaque triplet critique :

**- Identification des effets possibles du vieillissement**

- Quelles sont les conséquences de ce triplet ?
- Ce triplet peut-il provoquer l'apparition d'éventuels nouveaux mécanismes ?

**- Evaluation de la maintenance actuelle**

- Les inspections pour ce triplet sont-elles efficaces ?

**- Identification des éventuelles améliorations**

- Si les inspections ne sont pas efficaces, proposer des inspections plus efficaces des zones concernées.
- Pour éviter ou ralentir l'apparition du mécanisme critique :
  - Est-il possible de changer les paramètres d'exploitation ? Comment ?
    - Sinon, est-il possible de changer ou de restaurer des caractéristiques des matériaux ? Comment ?
    - Sinon, faut-il remplacer le matériel avec la même technologie ? Quand ?
    - Sinon, faut-il remplacer le matériel en procédant à sa reconception ? Quand ?

Le tableau 7.7 résume l'ensemble des documents à présenter et des questions à poser aux experts pour cette deuxième réunion, il indique en plus le type et les supports des réponses.

**Tableau 7.7 : Questionnaire pour la deuxième réunion dans le cadre de l'application de la démarche d'anticipation au pressuriseur et sa LEP.**

<b>Documents à présenter</b>	<b>Questions</b>	<b>Type de réponse et supports</b>
- Les schémas techniques	Pour chaque couple zone/mécanisme, l'expert devra indiquer si : - La probabilité d'amorçage à 60 ans est : 1 : faible, 2 : moyenne ou 3 : importante - La cinétique est : 1- lente, 2 - moyenne ou 3 - rapide	Réponses individuelles sur tableau Excel ou papier.
Aucun	Pour chaque case, l'expert devra indiquer si la gravité est : 1 - faible, 2 - moyenne ou 3 - importante	Réponses individuelles sur tableau Excel ou papier.
Aucun	1- Quelles sont les conséquences de ce triplet ? 2- Ce triplet peut-t-il provoquer l'apparition d'éventuels nouveaux mécanismes	Discussion
Présentation des CND (Contrôles Non Destructifs) permettant la surveillance du triplet critique	Les inspections pour ce triplet sont-elles efficaces ?	Discussion
- Présentation de la liste des méthodes génériques d'évaluation du vieillissement	Si les inspections ne sont pas efficaces, proposer des inspections plus efficaces des zones concernées.	Discussion
- Présentation de la liste des exemples de méthodes préventives pour contrer le vieillissement	Pour éviter ou ralentir l'apparition du mécanisme critique : - Est-il possible de changer les paramètres d'exploitation ? Comment ? - Sinon, est-il possible de changer ou de restaurer des caractéristiques des matériaux ? Comment ? - Sinon, faut-il remplacer le matériel avec la même technologie ? Quand ? - Sinon, faut-il remplacer le matériel en procédant à sa reconception ? Quand ?	Discussion

#### **4- Réunion 2 : élicitation**

##### **Les participants**

Plusieurs acteurs sont intervenus dans cette réunion :

- Les six experts
- Un animateur et deux coordinateurs pour présenter les différents documents et faire la synthèse des premiers résultats.
- Un rapporteur, pour observer et noter le déroulement de la réunion.

##### **Lieu, date et durée**

La réunion a eu lieu sur le site d'EDF à Saint-Denis, le 01/10/2004 de 14h à 17h30.

##### **Déroulement de la réunion**

a- Tour de table : présentation des différents participants

b- Présentation et validation des résultats de la réunion précédente : les triplets Zone/Mécanisme/Modes ou effets du vieillissement potentiels pour le pressuriseur et sa LEP (voir les tableaux 7.3 et 7.4).

c- Evaluation de la pertinence des couples Zone/Mécanisme à 60 ans : 4 experts (sur les six) ont participé à cette évaluation, les résultats sont donnés dans l'annexe 9.

d- Evaluation de la gravité des couples Zone/Mécanisme : 5 experts (sur les six) ont participé à cette évaluation, les résultats sont donnés dans l'annexe 10.

e- Synthèse des premiers résultats des deux évaluations (pertinence, gravité) et détermination de la criticité.

- Une première synthèse a été réalisée lors de la réunion grâce à un traitement informatisé des résultats de l'expertise. Une description de ce traitement est donnée dans le point « 5- Agrégation des résultats » qui suit.

- La criticité de tous les triplets est donnée en fonction de la pertinence et de la gravité par le tableau 7.8. Cette criticité a été déterminée selon la matrice décrite plus haut (voir figure 7.4) : 9 couples de criticité « importante » Zone/mécanisme ont été identifiés, 12 couples de criticité « moyenne » et 12 couples de criticité « faible ».

**Tableau 7.8 : Evaluation de la criticité des mécanismes de dégradation potentiels, en fonction de la pertinence et de la gravité.**

N°	Zone	Mécanisme de dégradation	Pertinence		Criticité
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	2	2	
2	Ensemble de l'enveloppe externe	Fatigue mécanique	1	3	2
3	Ensemble de l'enveloppe externe	Vieillissement thermique	2		3
4	Ensemble de l'enveloppe externe décalorifugée	Corrosion Atmosphérique	1	2	1
5	Enveloppe interne (mécanisme actif dans les phases d'arrêt)	Corrosion par piqûres	1	3	2
6	Enveloppe interne (revêtement inox)	Usure par corps migrants	1	2	1
7	Enveloppe interne (surtout à l'interface liquide-vapeur)	Fatigue à grand nombre de cycles	2	3	3
8	Enveloppe interne (zone de variation de l'interface liquide - vapeur)	Corrosion due à milieu biphasique	1	3	2
9	16MND5 (si percement préalable du revêtement)	CSC	2	3	3
10	16MND5 (si percement préalable du revêtement)	Fragilisation sous H2	2	3	3
11	Ensemble des zones en inox écroui dont dureté HV > 300	CSC	2	2	2
12	Ensemble des zones en inox (Mécanisme actif dans les phases d'arrêt.)	Corrosion inter-cristalline	1	2	1
13	Zone entre manchettes et cannes chauffantes	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	2	1	1
14	Zone entre cannes chauffantes et plaques de maintien	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	2	1	1
15	LBM	Corrosion Atmosphérique	2	2	2
16	Manchettes thermiques	Fatigue corrosion	2	2	
17	Manchettes de cannes chauffantes	Fatigue corrosion	2	2	2
18	Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion	Fatigue thermique	3	2	3

19	Zones où arrive un fluide de température différente	Fatigue thermique	2		2
20	Piquages	Fatigue mécanique	2	3	
21	Piquages inox	Fatigue thermique	2		2
22	Piquages inox	CSC	1		1
23	Piquages (tout ce qui est en 16MND5)	Vieillessement thermique	2	2	2
24	Piquage branche chaude	Fatigue à grand nombre de cycles	2	3	3
25	Goujons (suite à fuite d'acide borique)	CSC	2		1
26	Goujons	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	3	1	2
27	Goujons	Relaxation précontrainte	1		1
28	Boulons, joints, filetages	Matage	1		1
29	Boulons	Relaxation précontrainte	1	1	1
30	Buse d'aspersion	Erosion	1	1	1
31	Trou d'homme	Grippage	1	1	1
32	LEP	Fatigue corrosion	2	3	3
33	Zone sans pente de la LEP	Stratification	2	3	3

**Pertinence :**

1 faible  
2 moyenne  
3 importante

**Gravité :**

1 négligeable  
2 grave  
3 très grave

**Criticité :**

1 faible  
2 moyenne  
3 importante



#### f- Evaluation de la maintenance et identification des parades potentielles pour quelques triplets critiques

Tous les triplets de criticité « importante » devraient être étudiés dans cette étape. Cependant, les 9 triplets critiques ne pouvant être traités lors de la réunion, deux d'entre eux ont été choisis pour l'identification des parades potentielles. Ce choix a été fait en désignant ceux estimés importants par rapport aux triplets connus et traités précédemment avant cette application (suite aux études OMF, à une étude durabilité ou à un problème avéré par retour d'expérience, par exemple) :

**Triplet 1** : Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion / Fatigue thermique / Fissuration (voir ligne 18 du tableau 7.3)

**Triplet 2** : Piquage branche chaude / Fatigue à grand nombre de cycles / Faïençage (voir ligne 24 du tableau 7.3)

Certains triplets de criticité « moyenne » peuvent aussi mériter une anticipation. Lors de la réunion, un triplet de criticité « moyenne » a été jugé original, nous l'avons donc choisi pour cette étape de recherche de parades potentielles :

**Triplet 3** : Piquages (en acier 16 MND5) / Vieillessement thermique / Perte de caractéristiques des matériaux (voir ligne 23 du tableau 7.3)

Pour chaque triplet nous donnons ci-dessous les résultats de l'élicitation.

#### **Triplet 1 : Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion / Fatigue thermique / Fissuration**

##### **- Identification des effets possibles du vieillissement**

1- Identification des conséquences : Fuite, rupture

2- Apparition d'éventuels nouveaux mécanismes : Corrosion

### - Evaluation de la maintenance actuelle

1- Présentation des CND (Contrôles Non Destructifs) pour ce triplet critique (voir tableau 7.9 ci-dessous)

**Tableau 7.9 : Les contrôles non destructifs pour le triplet 1 [Bordes,2000].**

Zone	Contrôle non destructif	Fréquence
Soudure manchettes thermiques d'expansion	Gammagraphie double paroi	A chaque VC* et 2 entre VC*
	Ultrasons	
Soudure manchettes thermiques d'aspersion	Gammagraphie double paroi	A chaque VC* et 2 entre VC*

\* VC : Visite Complète.

2- Evaluation des inspections de ces triplets critiques

- La gammagraphie seule n'est pas suffisante, il est nécessaire de pouvoir procéder aussi à des contrôles ultrasons pour détecter les défauts et les éventuelles fissures de fatigue.
- La détection est considérée facile (probabilité de détection = 1).
- Les contrôles gammagraphiques sont perturbés par des pièges à contamination. Il est donc nécessaire de décontaminer, dès que la tranche dépasse les 15 années d'exploitation.
- Les contrôles sont à effectuer tous les 5 ans.

### - Identification des éventuelles améliorations permettant

1- d'assurer des inspections plus efficaces des zones concernées

- Il faudrait, pour des inspections plus efficaces, généraliser les contrôles ultrasons aux manchettes thermiques d'aspersion. Il se pose alors le problème technique de faisabilité à étudier.
- Cette méthode de contrôle suppose aussi des mesures de décontamination au niveau des manchettes thermique d'expansion, pour permettre une surveillance plus efficace.

2- d'éviter ou de ralentir l'apparition des mécanismes identifiés

- Changement des paramètres d'exploitation : réduire les écarts de température, éviter les phases de démarrage – arrêt
- A noter : une évolution réglementaire est prévue pour les manchettes d'aspersion.

### *Triplet 2 : Piquage branche chaude / Fatigue à grand nombre de cycles / Faïençage*

#### - Identification des effets possibles du vieillissement

1- Identification des conséquences : fuite, rupture

2- Couplage possible entre mécanismes : fatigue thermique / Fissuration

#### - Evaluation de la maintenance actuelle

1- Présentation des CND (Contrôles Non Destructifs) pour ces triplets critiques

- Pas de contrôles existants
- 2- Evaluation des inspections de ces triplets critiques
- Inspections non existantes et donc non efficaces.

#### - Identification des éventuelles améliorations permettant

1- d'assurer des inspections plus efficaces des zones concernées

2- d'éviter ou de ralentir l'apparition des mécanismes identifiés

- Des moyens de contrôle (par ultrasons à l'extérieur) et de réparation (pour l'élimination du faïençage) sont en cours de développement.

### **Triplet 3 : Piquages (en acier 16 MND5) / Vieillesse thermique / Perte de caractéristiques des matériaux**

#### **- Identification des effets possibles du vieillissement**

1- Identification des conséquences

- Déchirure ductile (en cas de défauts de fabrication (sous revêtement) ou de fissures de fatigue)
- Rupture brutale (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)

2- Apparition d'éventuels nouveaux mécanismes : aucun

#### **- Evaluation de la maintenance actuelle**

1- Présentation des CND (Contrôles Non Destructifs) pour ce triplet critique (voir tableau 7.10 ci-dessous)

**Tableau 7.10 : Les contrôles non destructifs pour le triplet 3 [Bordes,2000].**

<b>Zone</b>	<b>Contrôle non destructif</b>	<b>Fréquence</b>
Soudure dôme/tubulure d'aspersion	Gammagraphie simple paroi	A chaque VC*
Soudure fond/tubulure d'expansion	Gammagraphie simple paroi	A chaque VC*

\* VC : Visite Complète.

2- Evaluation des inspections de ces triplets critiques

- Il faut aussi refaire le calcul des défauts critique à 60 ans (et non plus à 40 ans)

#### **- Identification des éventuelles améliorations permettant**

1- d'assurer des inspections plus efficaces des zones concernées

- Si le défaut calculé est critique par rapport au défaut de fabrication, on procède à des contrôles par ultrasons. Il y a toutefois des problèmes liés à la géométrie, à l'accès.
- Des actions de recherche et développement sont en cours pour la détection des petits défauts.

2- d'éviter ou de ralentir l'apparition des mécanismes identifiés

- Changement des paramètres d'exploitation : réduire les sollicitations en réchauffant l'eau, lors des phases d'arrêt (il existe un risque lié aux températures basses pouvant conduire à la rupture fragile).

## **5- Réunion 2 : agrégation des résultats**

Pour obtenir une évaluation de la pertinence et de la gravité, pour chaque couple Zone/Mécanisme, il est nécessaire d'agréger les différentes estimations des experts. Il est aussi intéressant d'analyser l'ensemble des ces expertises. Pour cela, un outil de traitement de l'expertise appelé « Elicitation » a été élaboré et utilisé lors de la réunion.

### 5.1- Evaluation de la pertinence

On agrège comme suit les résultats des experts concernant la pertinence, pour chaque couple :

- Pour chaque expert, nous évaluons la pertinence de chaque couple en fonction de la probabilité d'amorçage et de la cinétique selon la matrice donnée en figure 7.3.

- Nous agréons ensuite les estimations de la pertinence correspondant aux résultats fournis par l'ensemble des experts en une seule valeur représentant la moyenne P.
- La moyenne P calculée est ensuite interprétée comme suit :
  - Si  $P < 1,5$  alors la pertinence est « faible » :  $Pertinence = 1$
  - Si  $1,5 \leq P \leq 2$  alors la pertinence est « moyenne » :  $Pertinence = 2$
  - Si  $P > 2$  alors la pertinence est « importante » :  $Pertinence = 3$
  - Ces intervalles ont été choisis afin d'assurer trois niveaux de pertinence.
- Notons que nous considérons que tous les experts ont le même poids lors du calcul de la moyenne.
- L'ensemble des résultats est donné en annexe 9.

A titre d'exemple nous présentons l'évaluation de la pertinence pour le couple ensemble de l'enveloppe externe/ corrosion due à une fuite d'acide borique concentré.

**Tableau 7.11 : L'évaluation de la pertinence pour le couple ensemble de l'enveloppe externe/ corrosion due à une fuite d'acide borique concentré.**

N°	Zone	Mécanisme de dégradation	Probabilité d'amorçage à 60 ans				Cinétique				Pertinence				
			E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4	Moyenne
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	2	1	2	1	3	2	2	2	3	1	2	1	2

Le tableau 7.11 présente les valeurs de la probabilité d'amorçage à 60 ans et de la cinétique données par les experts pour ce couple. Les valeurs de la pertinence pour chaque expert sont les suivantes : « 3 » pour l'expert 1, « 1 » pour l'expert 2, « 2 » pour l'expert 3, et « 1 » pour l'expert 4.

En effet, l'expert 1, par exemple, a donné la valeur « 2 » pour la probabilité d'amorçage à 60 ans, c'est-à-dire qu'il estime cette probabilité « moyenne ». Il a donné la valeur « 3 » pour la cinétique, c'est-à-dire qu'il estime la cinétique « rapide ». En appliquant la matrice donnée par la figure 7.3, on obtient une valeur « 3 » pour la pertinence, c'est-à-dire que la pertinence est jugée « importante » selon l'expert 1 pour ce couple .

La moyenne de la pertinence sur l'ensemble des experts est de «  $P = 1,75$  ». Comme  $1,5 \leq P = 1,75 \leq 2$ , la pertinence est donc jugée « moyenne » et prend la valeur « 2 » pour ce couple « Ensemble de l'enveloppe externe/ Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré ».

### 5.2- Evaluation de la gravité

On agrège comme suit les résultats des experts concernant la gravité, pour chaque couple :

- Nous évaluons la gravité de chaque couple en agréant les valeurs données par tous les experts, à tous les critères (sûreté, coût,...) par un calcul de moyenne.

- La moyenne G calculée est ensuite interprétée comme suit :
  - Si  $G < 1,8$  alors la gravité est « négligeable » : Gravité=1
  - Si  $1,8 \leq G \leq 2,1$  alors la gravité est « moyenne » : Gravité =2
  - Si  $G > 2,1$  alors la gravité est « importante » : Gravité =3
  - Ces intervalles ont été choisis afin d'assurer trois niveaux de gravité.
- Comme pour l'évaluation de la pertinence, nous considérons que tous les experts ont le même poids lors du calcul de la moyenne.
- L'ensemble des résultats est donné en annexe 10.

A titre d'exemple nous présentons l'évaluation de la gravité pour le couple ensemble de l'enveloppe externe/ corrosion due à une fuite d'acide borique concentré.

**Tableau 7.12 : L'évaluation de la gravité pour le couple ensemble de l'enveloppe externe/ corrosion due à une fuite d'acide borique concentré par les experts.**

N°	Zone	Mécanisme de dégradation	Sûreté					Disponibilité					Coûts					Dosimétrie										
			E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5	
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	2	3		2	3	1	2		2	3		2			3	2	1	2					2	1	1	

Pour avoir la gravité pour ce couple nous faisons la moyenne de toutes ces valeurs. Nous obtenons alors une valeur de « 2,09 ». Comme  $1,8 \leq G \leq 2,1$  la gravité est donc jugée « moyenne » et prend la valeur « 2 » pour ce couple « Ensemble de l'enveloppe externe/ Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré ».

Nous considérons, dans cette estimation de la gravité, que tous les critères ont un poids égal. Il serait possible d'associer des poids aux différents critères en fonction de l'importance que nous leur accordons.

5.3- « Elicitation » un outil de traitement de l'expertise

Pour analyser les expertises, nous avons mis en place un traitement informatisé basé sur l'outil Excel, avec des interfaces développées en Visual Basic. L'interface d'accueil est donnée en figure 7.5.



**Figure 7.5 : Interface d'accueil de l'outil « Elicitation » de traitement de l'expertise.**

Les expertises sont saisies sur des feuilles Excel. L'outil permet alors de sélectionner ses feuilles en une collecte d'expertises de pertinence ou de gravité. Une fois le type d'expertise précisé, une feuille Excel regroupant l'ensemble des expertises est créée et on peut demander trois types d'analyse (voir figure 7.6) :

- des statistiques selon les valeurs attribuées par les experts à chaque critère, tous mécanismes confondus. Il est alors possible d'afficher les résultats par expert ou par critère.
- des statistiques selon les valeurs attribuées par les experts à chaque mécanisme, tous critères confondus. Il est alors possible d'afficher les résultats par expert ou par mécanisme.
- des statistiques selon les valeurs des critères pour chaque mécanisme, tous experts confondus. Il est alors possible d'afficher les résultats par mécanisme ou par critère.



Figure 7.6 : Interface de demande d'analyse des données.

Nous obtenons alors des évaluations, des moyennes, des nombres de réponses exprimées et des écarts types entre les différentes expertises (voir figure 7.7).

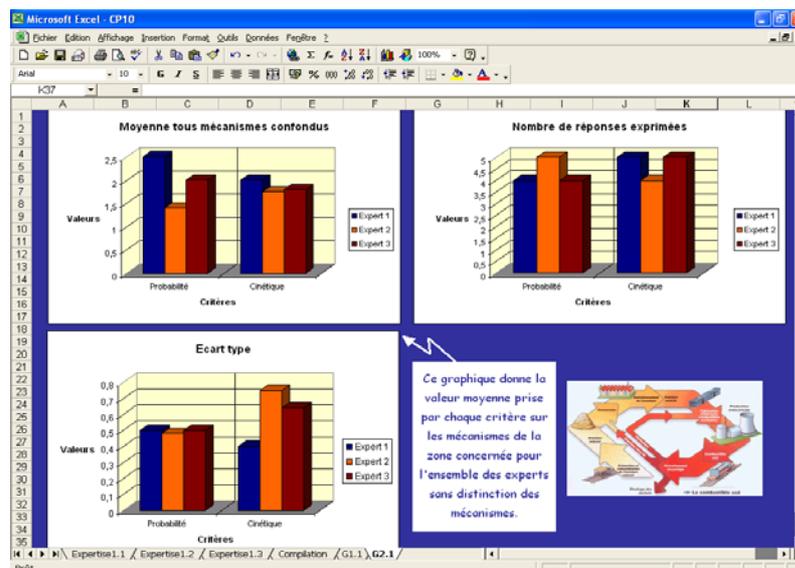


Figure 7.7 : Exemples de résultats donnés par l'outil de traitement de l'expertise.

#### 5.4- L'utilisation de l'outil de traitement de l'expertise « Elicitation » dans le cadre de la réunion 2

- Certains experts ont rempli les tableaux directement sur ordinateur, d'autres ont préféré remplir sur papier.
- Le traitement des données lors de la réunion est une lourde contrainte logistique, surtout quand il faut saisir des données sur ordinateur.
- Il faut rappeler enfin que le logiciel n'avait pas pu être testé auparavant.

#### **6- Réunion 2 : synthèse et capitalisation**

Suite à la réunion, un compte rendu résumant l'ensemble des résultats a été envoyé aux experts pour validation.

### **7.3.4 Phase 4 : Synthèse et capitalisation**

La synthèse des résultats de l'application est donnée dans un document intitulé « Document 3 : Synthèse des résultats de la démarche d'anticipation ». Les aspects liés à la capitalisation ont été traités dans le cadre du chapitre 6.

## **7.4 Evaluation de la démarche d'anticipation**

L'application de la démarche d'anticipation a eu plusieurs apports, aussi bien du point de vue méthodologique, que du point de vue industriel. Nous détaillons ces aspects à la suite. Un premier paragraphe donne une évaluation de la mise en œuvre de la démarche. Nous présentons ensuite une évaluation des résultats obtenus lors de l'application. Un dernier paragraphe est consacré à l'évaluation de la généricité de la démarche. Une application partielle à des matériels actifs, les machines tournantes, permet d'illustrer cette généricité.

### **7.4.1 Evaluation de la mise en œuvre de la démarche : application des méthodes de stimulation d'experts dans le cadre de réunions collectives**

Pour l'évaluation de la mise en œuvre de la démarche d'anticipation, deux paragraphes sont développés ci-dessous. Le premier s'intéresse à l'évaluation des méthodes de stimulation d'experts dans le cadre des réunions collectives. Les points positifs et les points négatifs sont présentés et analysés. Un deuxième présente les apports méthodologiques de l'application.

#### **7.4.1.1 Evaluation des méthodes de stimulation d'experts dans le cadre des réunions collectives**

L'application des méthodes de stimulation d'experts a été réalisée dans le cadre de deux réunions collectives, regroupant chacune six experts pluridisciplinaires (dont quatre ont participé aux deux réunions).

##### **Les points positifs**

- **Plusieurs points positifs peuvent être retenus suite à cette application :**
  - Les experts ont respecté la structure des réunions et ne se sont pas écartés des objectifs fixés.
  - Bien que les experts soient de caractères différents, aucun « leader » ne s'est imposé, tous les experts ont pu s'exprimer et toutes les idées ont été discutées.

- La pluridisciplinarité a été une vraie richesse et n'a pas constitué de barrière entre les experts, des échanges constructifs se sont instaurés et chacun a été à l'écoute des autres.
- Les experts ont été motivés par la démarche d'anticipation et ils ont exprimé à la fin de la première réunion, leur intérêt pour la poursuite de l'application.

- **Différentes raisons expliquent ces bons résultats :**

- La structuration des méthodes de stimulation a été efficace. Elle a permis de suivre un fil conducteur limitant les écarts par rapport aux objectifs des réunions sans pour autant constituer un frein aux échanges entre experts. La succession d'interrogations personnelles et de discussions par rapport à des opinions non nominatives semble bien fonctionner.
- L'animation a été efficace. En effet, l'animateur joue un rôle important dans la conduite de la réunion.
- Les informations présentées lors des réunions ont apporté un plus et ont été appréciées des experts.
- La pluridisciplinarité explique également la richesse des discussions et donc des résultats.
- Enfin, la compétence et l'esprit scientifique des experts ont été très bénéfiques pour l'application. Chacun est très compétent dans son domaine, mais ils sont tous ouverts à toute nouvelle approche et à l'écoute des autres.

**Les points négatifs**

- **Quelques points négatifs sont constatés suite à cette application :**

- L'utilisation des « post-it » lors de la première réunion était efficace, mais très contraignante pour les animateurs qui ont dû écrire un « post-it » pour chaque élément des listes de référence avant la réunion et les compléter par les nouveaux éléments donnés par les experts lors de la réunion. 61 « post-it » ont été utilisés lors de l'application !
- La première réunion de 3h30mn n'a pas été suffisante pour appliquer les trois filtres définis dans la méthode 1 de stimulation d'experts. Les deux derniers filtres ont dû être regroupés.
- La synthèse des résultats de l'évaluation de la criticité lors de la réunion 2 a été un travail difficile pour les animateurs.
- Un expert maintenance n'a pas pu répondre aux deux questionnaires concernant l'évaluation de la pertinence et de la gravité et un deuxième expert maintenance a seulement répondu à l'évaluation de la gravité.
- Lors de la réunion 2, le temps n'était pas suffisant pour évaluer tous les triplets critiques identifiés.

- **Des améliorations sont proposées pour remédier à ces points négatifs :**

- L'utilisation des « post-it » pour présenter les résultats des différents filtres de la méthode 1 de stimulation d'expert peut être remplacée par un outil informatique. Les experts peuvent alors donner leurs réponses sur ordinateur et ces résultats sont ensuite regroupés et projetés à l'ensemble des participants. L'analyste devra alors pouvoir enlever les mécanismes éliminés par les experts lors des discussions.
- Une réunion de 4 heures au moins pour l'application de la méthode 1 de stimulation d'experts permettrait l'application des trois filtres proposés.

- Il faudrait prévoir des réunions séparées : une pour l'évaluation de la pertinence et de la gravité des mécanismes de dégradation potentiels et une deuxième pour l'évaluation de la maintenance et l'identification de parades potentielles pour les mécanismes critiques :
  - Pour la première réunion, comme il s'agit d'interrogations individuelles, il est préférable de les faire avec chaque expert séparément. Ceci permet de diminuer la contrainte de trouver une date commune à tous les experts. Suite à la réunion 2, nous pouvons dire qu'une réunion individuelle de 2 heures serait suffisante.
  - Une réunion collective est nécessaire pour l'évaluation de la maintenance et l'identification de parades potentielles pour les mécanismes critiques. La durée de la réunion dépend du nombre de couples critiques Zone/Mécanisme de dégradation à étudier lors de la réunion, c'est donc à l'analyste de déterminer cette durée et d'envisager s'il est nécessaire d'organiser plusieurs réunions.

Nous rappelons qu'une analyse des résultats et de la mise en œuvre des réseaux bayésiens dans le cadre de l'application de la démarche d'anticipation est donnée dans le chapitre 5 (voir paragraphes 5.2.5 et 5.3.5).

#### **7.4.1.2 Les apports méthodologiques de l'application**

Nous pouvons constater que l'application de la démarche d'anticipation a plusieurs apports sur le plan méthodologique. Elle a permis :

- l'enrichissement des listes de référence des mécanismes de dégradation et de modes ou effets du vieillissement,
- l'estimation du nombre et de la durée des réunions nécessaires pour la mise en œuvre de la démarche,
- l'élaboration et l'exploitation d'un outil de traitement de l'expertise « Elicitation ».

### **7.4.2 Evaluation des résultats de l'application**

Afin d'évaluer les résultats obtenus lors de l'application, nous proposons de les comparer avec ceux donnés par d'autres études. Le choix du pressuriseur pour cette application, nous offre l'opportunité de faire cette comparaison avec les résultats donnés dans le cadre d'un projet EDF (Projet « Durabilité », Dossier Local Pressuriseur). Nous proposons aussi de comparer les résultats de l'application avec ceux donnés par le GALL, Generic Aging Lessons Learned (voir paragraphe 6.2). Un dernier point présente les apports industriels de l'application.

#### **7.4.2.1 Comparaison des résultats avec ceux obtenus lors d'une étude moins structurée**

Nous proposons dans ce paragraphe de comparer les résultats obtenus suite à l'application de la démarche avec ceux obtenus lors d'une étude EDF moins structurée. Dans le cadre d'un projet, ayant pour objectif d'évaluer la possibilité de prolonger la durée d'exploitation des centrales nucléaires à 60 ans, une étude visant à identifier les problèmes potentiels concernant le pressuriseur a été menée à EDF. Ces problèmes potentiels sont présentés dans le tableau 7.13 ci-après.

Notons que deux de ces problèmes potentiels (lignes 7 et 9 du tableau 7.13) concernent les cannes chauffantes du pressuriseur, qui ne rentrent pas dans le cadre de l'application de la démarche d'anticipation. Un problème lié à

la fabrication des LBM (liaisons bimétalliques, ligne 13 du tableau 7.13) n'est pas un problème de vieillissement, il n'apparaît donc pas dans le tableau des triplets potentiels identifiés. Les défauts de fabrications sont cependant pris en compte en tant que donnée d'entrée de la démarche AVISE. Tous les autres problèmes, soit 14 problèmes, ont été identifiés lors de cette dernière. Ceci peut s'expliquer, en partie, par le fait que plusieurs experts ayant participé à cette étude ont été ensuite sollicités dans le cadre de l'application de la démarche AVISE.

**Tableau 7.13 : Identification des problèmes potentiels concernant le pressuriseur à l'horizon de 60 ans – extrait de l'étude [Billy et al., 2003].**

N° du couple	Zone ou défaut	Mécanisme / Mode
<b>1</b>	<b>LEP, premier coude sous le pressuriseur</b>	<b>Fatigue</b>
<b>2</b>	<b>ZS de la tubulure d'aspersion</b>	<b>Fatigue</b>
<b>3</b>	<b>ZS de la tubulure d'expansion</b>	<b>Fatigue</b>
4	Peau interne des manchettes de cannes chauffantes	Fatigue
<b>5</b>	<b>Piquage branche chaude, LEP</b>	<b>Fatigue à grand nombre de cycles, changement de courbes de fatigue</b>
<b>6</b>	-	<b>Fatigue/Fissure</b>
7	Enveloppe des cannes chauffantes	CSC inox/Fissure
<b>8</b>	<b>Manchettes de cannes chauffantes</b>	<b>Fatigue/ Fuite au niveau de la ZS des manchettes des cannes chauffantes</b>
9	Canne chauffante	Fusion suite à arc électrique/ Fuite au niveau des cannes chauffantes
<b>10</b>	<b>Virole soumise aux aspersion, Coin de la tubulure d'aspersion</b>	<b>Rupture brutale</b>
11	Viroles	DSR
12	LBM	Corrosion atmosphérique/ Décohésions Inter Granulaires (DIG)
13	LBM	Fabrication
14	Interface eau-vapeur	Dégradation
15	-	Séisme
16	-	Fatigue-corrosion/ Fissure
17	viroles	Vieillessement thermique/ Rupture brutale

Les lignes en gras, sont celles des problèmes jugés prioritaires.

Nous remarquons aussi, que plusieurs problèmes potentiels identifiés lors de l'application de la démarche d'anticipation n'ont pas été mis en évidence dans cette étude. En effet, sur les 33 couples obtenus par l'application de la démarche AVISE, 18 couples ne sont pas identifiés dans cette étude EDF.

Finalement, nous remarquons que la démarche AVISE apporte une homogénéité des résultats par rapport à l'étude EDF et permet en plus leur hiérarchisation.

#### 7.4.2.2 Comparaison des résultats avec ceux obtenus par GALL

Le GALL donne des couples Zone/Mécanisme potentiels pour le pressuriseur, présentés dans le tableau 7.14 ci-après. Avant de procéder à la comparaison, notons qu'il n'y a pas d'alliage 600 et d'inconel sur les pressuriseurs des centrales nucléaires françaises. La comparaison n'est donc pas possible avec les centrales américaines sur cet

aspect. Pour les autres composants cités dans le tableau 7.14 et qui ne sont pas en alliage 600 ou en inconel, nous pouvons constater que tous les couples leur correspondant ont été identifiés dans le cadre de l'application de la démarche AVISE au pressuriseur. De plus, plusieurs couples identifiés lors de l'application n'apparaissent pas dans le tableau 7.14 du GALL.

**Tableau 7.14 : Les couples Zone/Mécanisme potentiels pour le pressuriseur d'après le GALL.**

Composant	Matériau	Mécanisme de dégradation
Virole, peau interne	- Alliage 600 - Alliage 82 ou 182	- fatigue - corrosion sous contrainte, chargements cycliques
Virole, peau externe	- Acier faiblement allié	- corrosion par acide borique, perte d'épaisseur
Ligne d'aspersion	- Alliage 600 moulé	- fatigue - corrosion sous contrainte, fissures, PWSCC - perte de ténacité, fragilisation par vieillissement thermique
Buse d'aspersion	- Acier au C et revêtement en acier inoxydable	- fatigue - corrosion sous contrainte, fissures
Piquages de la ligne d'expansion	- Acier au C et revêtement en acier inoxydable	- fatigue
Manchettes thermiques	- Alliage 600	- fatigue
Traversées	- Alliage 600  - Alliage 600 et soudure en inconel 182	- fatigue - corrosion sous contrainte, fissures  - PWSCC
Embout de sécurité	- Acier inoxydable	- fatigue - corrosion sous contrainte, fissures
Buse d'expansion	- Acier au C et revêtement en acier inoxydable - Acier moulé - Acier moulé	- corrosion sous contrainte, fissures - corrosion sous contrainte, fissures - perte de ténacité, fragilisation par vieillissement thermique
Trou d'homme et brides	- Acier faiblement allié ou inoxydable ou 82, 182	- corrosion sous contrainte, fissures, PWSCC - corrosion par acide borique, perte d'épaisseur
Trou d'homme et boulons d'assemble	- Acier à haute résistance mécanique faiblement allié	- corrosion sous contrainte, fissures - corrosion par acide borique, perte d'épaisseur - perte de serrage, relaxation
Gaines et manchettes de cannes chauffantes	- Acier inoxydable ou alliage 600	- fatigue - fissures, corrosion sous contrainte ou PWSCC
Jupe support	- Acier au C	- fatigue
Support intégral	- Acier au C	- corrosion par acide borique, perte d'épaisseur - fissures, chargements cycliques - fatigue

Nous pouvons donc constater que les résultats obtenus lors de l'application de la démarche sont plus exhaustifs et plus homogènes par rapport à ceux donnés par d'autres études. En partant de ce résultat homogène sur les couples Zone/Mécanisme de dégradation, la démarche permet en plus d'aborder l'analyse de la pertinence et de la gravité de ces couples et donc de les hiérarchiser. On obtient alors une image quantifiée de l'état du matériel.

### **7.4.2.3 Les apports industriels de l'application**

En plus d'identifier les problèmes potentiels liés au vieillissement du pressuriseur et de proposer les solutions adéquates, cette application a permis aux experts de maintenance, selon les dires d'un expert participant à la réunion 2, de valider leurs centres d'intérêts dans les travaux d'optimisation de la maintenance et de mettre en évidence de nouvelles problématiques.

L'application de la démarche, a permis aussi aux experts ayant participé aux réunions collectives, d'enrichir leurs connaissances sur le matériel par échange de points de vue et discussions.

### **7.4.3 Généricité de la démarche d'anticipation : application à des matériels actifs, les machines tournantes**

La démarche développée dans le cadre de ce travail est adaptée à l'anticipation du vieillissement d'un matériel passif (voir paragraphe 2.1). Elle peut être cependant aussi adaptée à l'anticipation du vieillissement des matériels actifs, critiques en termes de sûreté, de disponibilité ou de coûts.

Certains composants du matériel actif sont des composants d'usure, qu'il faut changer périodiquement, d'autres composants sont structurels et leur durée de vie peut conditionner celle du matériel. Il faudrait donc dans un premier temps sélectionner les zones et les composants structurels du matériel auxquels il convient d'appliquer la démarche d'anticipation.

Dans un premier paragraphe, les différentes adaptations, permettant l'anticipation du vieillissement d'un matériel actif et plus précisément de ses zones structurelles, sont précisées pour la structure de la démarche. Ensuite, nous étudions l'adaptabilité des supports méthodologiques de la démarche : les méthodes de stimulation d'experts et les réseaux bayésiens.

#### **7.4.3.1 Adaptation de la démarche d'anticipation dans sa structure**

Les phases 1, 2 et 4 de la démarche d'anticipation sont génériques et s'appliquent à tout type de matériel. Pour la phase 3, il s'agit d'adapter le processus d'anticipation aux matériels actifs. Par définition, les contraintes pour un matériel actif sont importantes et souvent il s'agit d'une combinaison de contraintes de différentes natures (contraintes thermiques, mécaniques, ...). Ainsi, un mode de défaillance est généralement le résultat de plusieurs mécanismes de dégradation qu'il est difficile d'identifier. Ce sont donc les modes de défaillance qu'il faut anticiper.

Le processus d'anticipation peut alors être adapté comme suit :

Etape 1 : Identification des modes de défaillance potentiels pour les zones structurelles du matériel :  
identification de couples Zone structurelle/ Mode de défaillance.

Etape 2 : Pertinence des modes de défaillance potentiels à l'horizon d'exploitation.

Etape 3 : Hiérarchisation des modes de défaillance (évaluation de la gravité, puis de la criticité)

Etapes 4 : Identification des parades potentielles.

### 7.4.3.2 Adaptabilité des méthodes de stimulation d'experts

La structure des méthodes de stimulation d'experts, ayant été développée indépendamment de la nature du matériel, nous estimons qu'elle peut être conservée. Pour certains composants structurels de matériels actifs (la volute d'une pompe primaire par exemple), les méthodes, telles qu'elles sont appliquées aux matériels passifs, sont bien adaptées. Pour d'autres composants d'usure (anticiper la rupture d'un arbre, par exemple), les filtres successifs de la méthode 1 peuvent être appliqués selon le même principe, mais plutôt à des modes de défaillances.

Cependant, les supports informationnels dépendent directement du matériel et doivent donc être adaptés. A titre d'exemple, la liste de référence des mécanismes de dégradation est a priori insuffisante. Elle doit être appuyée par la liste des modes ou effets du vieillissement. Cette dernière doit être enrichie et adaptée aux matériels actifs. Nous pensons donc que les méthodes de stimulation d'experts peuvent être adaptées à l'anticipation du vieillissement des matériels actifs. Pour les composants d'usure, d'autres méthodes existent, comme l'AMDE par exemple. Il convient donc d'étudier l'apport de la démarche AVISE par rapport à ces méthodes.

### 7.4.3.3 Adaptabilité des réseaux bayésiens

Les réseaux bayésiens pour l'étude de la pertinence des mécanismes de dégradation sont construits à partir des paramètres qui influencent l'apparition de ces mécanismes. L'adaptabilité de ce type de réseau aux modes de défaillance est à étudier. Pour l'évaluation de cette pertinence, il est cependant toujours possible d'avoir recours à l'expertise.

Les réseaux bayésiens pour l'évaluation de l'impact sur le vieillissement peuvent être adaptés aux modes de défaillances. Un exemple de matériel actif, une famille de machines tournantes, a été choisi pour illustrer cette adaptation. Une étude ayant été faite auprès des experts pour l'évaluation du vieillissement des machines tournantes, nous disposons donc d'une donnée d'entrée sur l'évaluation du vieillissement. Cette évaluation peut remplacer le résultat donné par le réseau bayésien pour l'évaluation de la pertinence d'un mécanisme de dégradation dans le cas des matériels passifs.

La variable « pertinence du mécanisme de dégradation à N ans » avec les modalités « Oui » et « Non », peut être remplacée par « Avis d'experts sur le vieillissement à N ans » avec les modalités « Vieillissement » et « non-vieillissement ».

Les probabilités a priori ont été renseignées par expertise. Trois paramètres sont, selon l'expert, dépendants de la durée d'exploitation prévue : la cinétique et l'efficacité de la maintenance et l'obsolescence [Lannoy et Procaccia, 2005].

- La cinétique est donnée par une loi de Weibull  $W(1,1;10)$  déterminée par des données du retour d'expérience.
- L'efficacité de la maintenance est décroissante avec à la durée d'exploitation.
- A partir de 2013, la probabilité d'obsolescence est égale à 1, avant elle est considérée nulle.

Les probabilités conditionnelles sont les mêmes que celles identifiées dans le cadre de l'application au pressuriseur (voir paragraphe 5.3). Trois exemples de réseaux sont alors donnés, pour trois horizons d'exploitation possibles : 30, 40 et 50 ans (voir respectivement les figures 7. 8, 7.9 et 7.10).

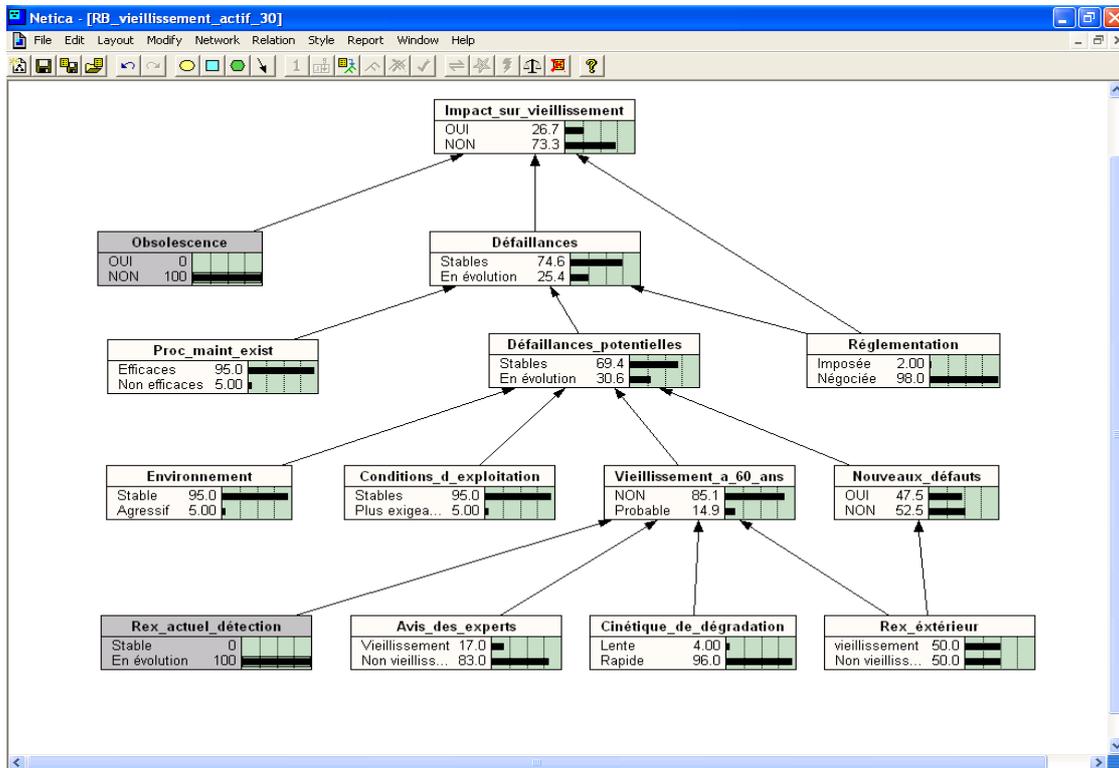


Figure 7.8 : Evaluation du vieillissement pour les machines tournantes à un horizon d'exploitation de 30 ans.

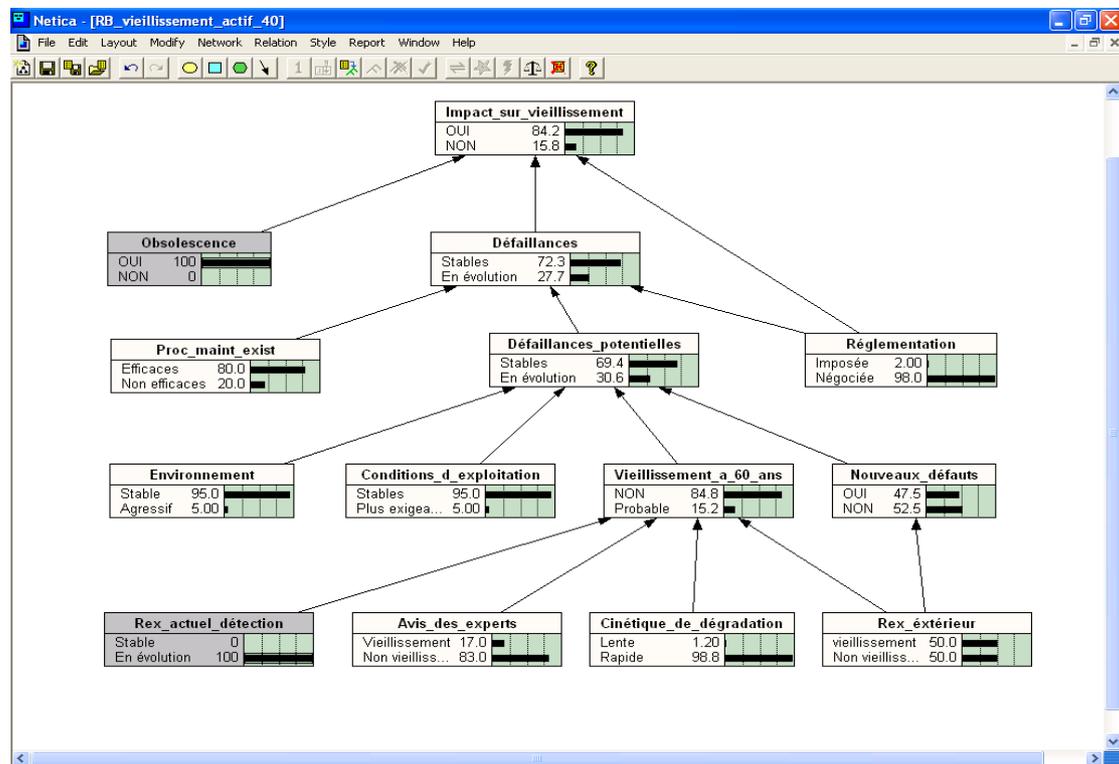
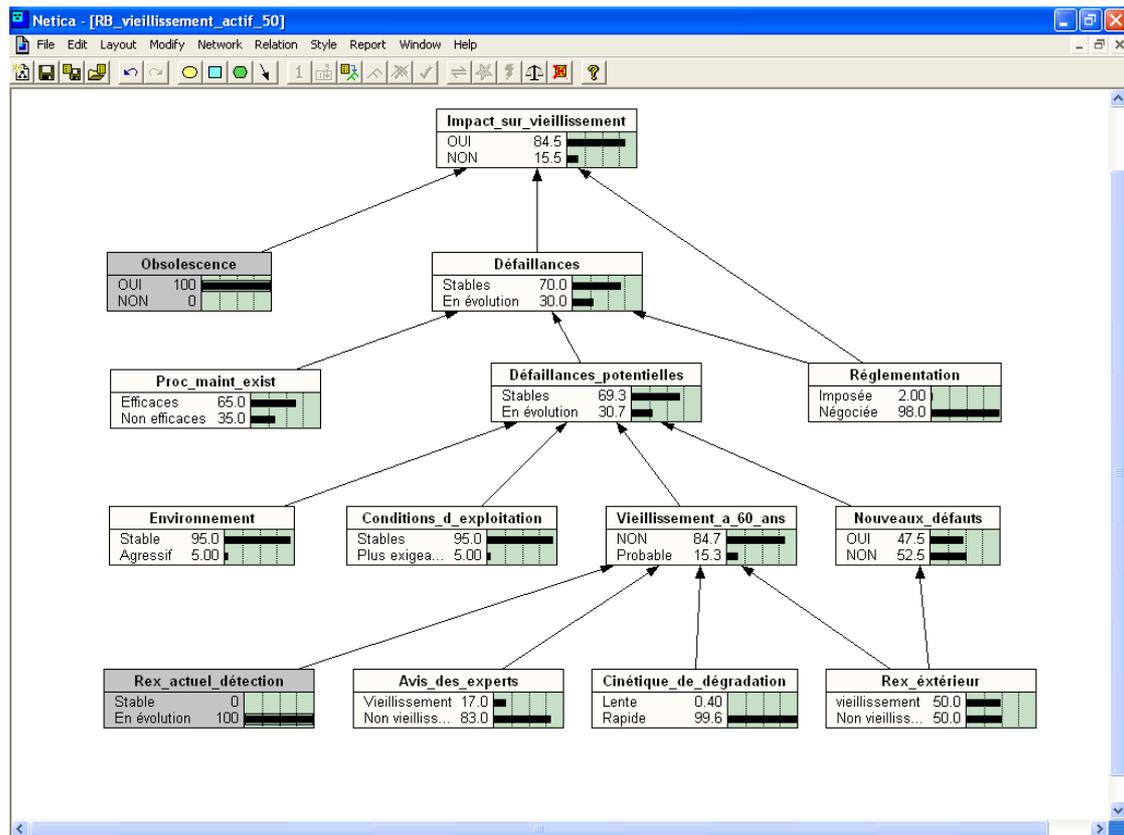


Figure 7.9 : Evaluation du vieillissement pour les machines tournantes à un horizon d'exploitation de 40 ans.



**Figure 7.10 : Evaluation du vieillissement pour les machines tournantes à un horizon d'exploitation de 50 ans.**

Nous constatons donc d'après ces trois réseaux, que l'obsolescence joue un rôle très important pour l'impact sur le vieillissement de ces machines tournantes.

Cet exemple montre l'adaptabilité du réseau bayésien « impact sur le vieillissement » aux matériels actifs.

## Conclusion

Afin de valider la démarche d'anticipation développée dans le cadre de ce travail de recherche, une application complète a été réalisée sur un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur. Cette application présente des intérêts sur les plans méthodologiques et industriels. De nombreux points positifs ont été recensés et analysés, et des améliorations ont été proposées pour éliminer les points négatifs révélés au cours de l'application. Cette application a permis de valider la démarche AVISE, les méthodes et les outils employés, et aussi de la faire progresser.

La comparaison des résultats de l'application avec ceux donnés par d'autres méthodes a montré l'intérêt d'une démarche d'anticipation structurée. Enfin, une étude de la généricité de la démarche a permis de montrer l'adaptabilité de sa structure et de ses supports méthodologiques à tout type de matériel.



## **Conclusion générale**



Ce travail de thèse a apporté une contribution, principalement, dans les domaines de l'étude du vieillissement à long terme et de la gestion de fin de vie des installations industrielles.

Afin d'anticiper les défaillances dues au vieillissement des installations à la période de fin de vie et de prolonger si possible leur exploitation, une démarche fondée sur l'interrogation et la stimulation d'experts, a été développée puis validée par une application réelle sur un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur.

Cette démarche a été intitulée **AVISE**, Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts.

La problématique de recherche a été formulée dans un contexte industriel particulier, le contexte du nucléaire. Ce dernier est caractérisé par des matériels spécifiques, particulièrement fiables et ayant donc un faible retour d'expérience (peu de défaillances observées). La démarche développée s'appuie sur un ensemble d'informations existantes relatives au matériel étudié et en particulier son retour d'expérience. Pour compenser ce retour d'expérience faible, voire inexistant, deux solutions ont été proposées dans la démarche. La première solution, considérée comme classique, consiste à avoir recours aux opinions d'experts. La seconde, plus originale, consiste à enrichir le retour d'expérience du matériel étudié par le retour d'expérience relevé sur des matériels dits « analogues ».

Afin de mettre en œuvre ces solutions et d'atteindre les objectifs de l'anticipation, plusieurs supports méthodologiques ont été conçus puis testés dans le cadre de l'application. Ces supports sont issus de divers domaines qui sont l'interrogation d'experts, l'aide à la créativité, les modélisations graphiques probabilistes et l'ingénierie des connaissances.

Bien que la démarche d'anticipation ait été construite pour le contexte particulier du nucléaire, nous pensons qu'elle peut être adaptée puis utilisée dans d'autres contextes industriels ayant les mêmes besoins de gestion de cycle de vie des installations (notamment pour les installations à durée de vie longue, nécessitant des investissements importants) et les mêmes contraintes de spécificité des matériels et de faible retour d'expérience. Nous pouvons citer à titre d'exemple : l'aérospatial, le ferroviaire, le naval, la chimie, l'exploitation pétrolière, ...

Notons aussi que la plupart des méthodes et outils, développés dans le cadre de ce travail, peuvent être utilisés sur d'autres thématiques, lorsqu'il s'agit d'anticiper des événements indésirables, comme par exemple en analyse de risques, en prospective, en analyse prévisionnelle, bref dans tout domaine où il s'agit d'imaginer des situations à « risques ».

## Résultats scientifiques

Différents résultats scientifiques originaux ont été apportés dans ce travail de recherche. Plusieurs champs sont concernés :

- l'aide à l'évaluation de la fiabilité à long terme,
- l'interrogation d'experts,
- les méthodes de résolution de problèmes et d'aide à la créativité,
- les modélisations graphiques probabilistes : les réseaux bayésiens,
- l'ingénierie des connaissances.

### L'aide à l'évaluation de la fiabilité à long terme

- La principale contribution de ce travail de recherche est **le développement et la validation d'une démarche structurée, complète et exhaustive** pour l'anticipation du vieillissement des matériels passifs : AVISE. La mise en œuvre de la démarche a été jugée efficace, par les experts, par rapport aux dégradations à long terme et aux dégradations accidentelles. L'aspect pluridisciplinaire a été notamment apprécié par les experts.
- Un autre résultat important dans ce domaine est la construction de listes de référence de mécanismes de dégradation et de modes ou effets du vieillissement. Grâce à l'utilisation de ces listes de référence, la démarche a été jugée exhaustive par les experts lors de l'application.

### L'interrogation d'experts

- Une comparaison entre une dizaine de méthodes d'interrogation d'experts a permis de dégager un certain nombre de caractéristiques intéressantes pour la construction d'une méthode d'interrogation d'experts adaptée à l'anticipation.
- Cette analyse comparative a aussi débouché sur l'identification d'un processus générique d'interrogation d'experts qui a ensuite été utilisé dans le cadre de l'application de la démarche.

### Les méthodes de résolution de problèmes et d'aide à la créativité

Deux méthodes complémentaires ont été proposées :

- Une méthode intitulée STIMEX-IMDP, STIMulation d'EXperts pour l'Identification de Mécanismes de Dégradation Potentiels. Cette méthode s'appuie sur les listes de référence précédentes de mécanismes de dégradation et de modes ou effets du vieillissement, sur les données existantes du matériel, mais aussi sur le retour d'expérience de matériels « analogues » pour stimuler la créativité des experts. La méthode STIMEX-IMDP a été structurée en tenant compte des notions de base de l'aide à la créativité, de manière à guider les experts dans leur réflexion sans qu'ils soient conditionnés par leur domaine de compétence. Des solutions ont été aussi proposées pour permettre aux experts de s'exprimer sans la peur d'être jugés ou évalués par les autres.

- Une méthode intitulée STIMEX-IPP, STIMulation d'EXperts pour l'Identification de Parades Potentielles. La structuration de cette méthode est basée principalement sur une typologie des parades potentielles qui en constitue le fil conducteur. La réflexion ainsi structurée conduit à considérer différents types de solutions possibles. La méthode s'appuie sur des informations permettant de stimuler les experts pour extraire les connaissances utiles à l'anticipation. Les principales informations sont des solutions génériques d'évaluation et de prévention du vieillissement et les retours d'expérience analogue et extérieur.

### **Les modélisations graphiques probabilistes : les réseaux bayésiens**

Plusieurs contributions ont été réalisées sur ce plan :

- Présentation d'une méthode de construction et de quantification d'un réseau bayésien pour l'étude de la pertinence d'un mécanisme de dégradation. Un exemple de réseau a été construit et quantifié. Il permet d'évaluer la pertinence de la fatigue thermique pour un matériel donné et à un horizon d'exploitation donné. Un second réseau relatif à l'évaluation de la pertinence de la corrosion sous contrainte a aussi été construit, mais il n'a été ni validé, ni quantifié. Ce type de réseaux peut être considéré générique. Il pourrait être associé à la liste de référence des mécanismes de dégradation.
- Présentation d'une méthode de construction et de quantification d'un réseau bayésien pour l'étude de l'impact sur le vieillissement d'un mécanisme de dégradation. Ce réseau s'appuie sur l'évaluation de la pertinence du mécanisme fournie, par le réseau précédent. Il intègre l'influence de plusieurs paramètres relatifs à l'impact de ce mécanisme sur le vieillissement du matériel étudié comme par exemple la cinétique d'évolution de la dégradation, la politique d'exploitation ou encore l'efficacité de la maintenance existante par rapport au mécanisme. Cette quantification de l'impact sur le vieillissement des mécanismes potentiels permet de les hiérarchiser par rapport aux risques qu'ils présentent. D'autre part, le réseau bayésien est un outil d'aide à la décision. Il permet d'identifier les paramètres influents et particulièrement ceux sur lesquels il est possible d'agir, d'imaginer des actions dont on peut alors mesurer l'intérêt pour la maîtrise du vieillissement.
- Définition d'un ensemble de bonnes pratiques pour la mise en œuvre d'un réseau bayésien.

### **L'ingénierie des connaissances**

- A ce niveau la contribution consiste en l'identification des spécifications et la construction d'un modèle conceptuel de données pour la création d'une base de données de vieillissement. Cette base permet la capitalisation de la démarche d'anticipation et de ses résultats. Les données à capitaliser, pour une utilisation ultérieure dans les études technico-économiques de gestion de cycle de vie, ont été identifiées sur la base des travaux réalisés dans la thèse.

## Résultats industriels

Une application complète de la démarche d'anticipation à un matériel passif d'une centrale nucléaire, le pressuriseur a été réalisée. Elle a permis l'identification des problèmes potentiels liés au vieillissement du pressuriseur, la mesure des risques pris, en termes de conséquences ou de probabilité d'apparition d'un mécanisme, et la proposition de solutions adéquates pour freiner ou éviter ce vieillissement. Notons que notre application a mis en évidence quelques mécanismes de dégradation qui n'avaient pas été identifiés lors d'une étude antérieure, moins structurée et moins systématique. En outre, rappelons que notre démarche a permis de calculer une pertinence, une probabilité d'impact sur le vieillissement compte-tenu de la maintenance existante. Elle a permis de quantifier les mécanismes de dégradation et donc de les hiérarchiser.

Cette démarche d'avère bénéfique sur de nombreux sujets.

- Les résultats de la démarche d'anticipation permettent aux experts de maintenance de valider les travaux de recherche et développement en cours pour l'optimisation de la maintenance et de mettre en évidence des nouvelles problématiques à considérer (par exemple, dans le cas où il s'avère que la maintenance existante n'est pas suffisamment efficace, la démarche identifie alors la zone concernée et le mécanisme à contrer).
- La capitalisation de la démarche et de ses résultats a débouché sur une base de données de vieillissement regroupant toutes les informations liées au matériel sur un même support. Cette base représente une aide précieuse et procure un gain de temps pour les divers acteurs concernés :
  - dans leur travail quotidien, comme par exemple la recherche de solutions analogues par les experts en maintenance.
  - pour la traçabilité des résultats de la démarche.
  - pour la réactualisation de cette dernière.
  - pour d'éventuelles applications futures de la démarche sur d'autres matériels.
  - pour mener à bien des études de vieillissement physique ou des études technico-économiques de durabilité.
- La démarche d'anticipation peut donner une justification auprès des autorités de sûreté, des différentes décisions concernant l'exploitation et la maintenance des matériels étudiés.
- L'application de la démarche d'anticipation permet aux experts qui participent aux réunions collectives d'enrichir leurs connaissances en échangeant leurs expertises lors des discussions.

## Perspectives scientifiques

Ce travail permet de dégager plusieurs pistes de recherche :

- Une première perspective de ce travail est liée à la généralité de la démarche développée par rapport aux types de matériels traités. Un premier exemple d'analyse est présenté aux chapitres 2 et 7 concernant l'adaptabilité de la démarche d'anticipation aux matériels actifs. Les résultats de cette analyse laissent à penser que cette adaptation est possible. Plusieurs pistes sont données dans ce sens aussi bien au niveau de la structure de la démarche qu'au niveau des supports méthodologiques. Nous pensons que cette adaptation de la démarche d'anticipation aux matériels actifs est une perspective essentielle de ce travail de recherche, d'autant plus que quelques matériels actifs sont importants pour les études de durabilité, ceux importants pour la disponibilité.
- Les résultats de la démarche peuvent constituer une donnée d'entrée pour la quantification de la fiabilité à long terme prenant en compte l'évolution du vieillissement, l'anticipation des mécanismes de dégradation, l'évaluation de l'efficacité de la maintenance existante et la mise en œuvre de nouvelles parades. Il s'agit bien, dans ce cadre, compte-tenu du retour d'expérience observé et des résultats de l'anticipation, de déterminer une loi de fiabilité prévisionnelle, « extrapolée », de l'instant d'observation à la fin de vie.
- Une troisième perspective est liée à l'étude de la généralité de la démarche et son adaptation par rapport à d'autres domaines d'application : l'analyse des risques (l'anticipation d'accidents industriels,...), la prospective, la gouvernance, l'anticipation de catastrophes naturelles (séismes,...), le facteur humain (l'anticipation des erreurs humaines), ...
- Pour gérer le cycle de vie d'une installation, les résultats de la démarche d'anticipation des matériels critiques constituent une donnée d'entrée pour une étude de vieillissement physique ou une étude technico-économique. Il revient alors au décideur de choisir pour chaque matériel les parades « optimales » au niveau de l'ensemble de l'installation.

## Perspectives industrielles

Nous donnons ici trois perspectives industrielles à ce travail :

- La première perspective est liée à l'utilisation des réseaux bayésiens pour l'évaluation de la pertinence des mécanismes de dégradation potentiels. Bien que cette pertinence ait été renseignée, dans le cadre de l'application, en demandant aux experts d'en fournir une estimation directe, cette solution est moins intéressante et moins fiable que celle donnée par les réseaux bayésiens. En effet, ces derniers permettent de justifier de cette pertinence en fonction des paramètres influant sur l'apparition du mécanisme. Cet outil donne en plus une modélisation physique de la dégradation qui peut enrichir ou simplement formaliser les connaissances liées aux mécanismes de dégradation. Cette modélisation peut être utilisée dans d'autres applications en dehors de la démarche d'anticipation. Nous pensons qu'il est donc intéressant de construire des réseaux bayésiens pour l'étude de la pertinence d'un mécanisme de dégradation correspondant aux mécanismes de la liste de référence (autres que la fatigue thermique et la corrosion sous contraintes), du moins à ceux les plus courants recensés lors de l'exploitation.
- La seconde perspective consiste en la construction d'une base de données opérationnelle pour la capitalisation de la démarche d'anticipation et de ses résultats. Cette base est essentielle pour d'éventuelles applications futures de la démarche. Elle peut être très utile pour les études technico-économiques de gestion de cycle de vie, notamment pour apprécier le vieillissement physique des installations. Cette base peut être une référence pour les exploitants et les experts de maintenance, mais aussi pour les autorités, les ingénieurs de conception et les chercheurs.
- Une dernière perspective de ce travail, « stratégique », est de poursuivre le suivi du retour d'expérience des centrales les plus âgées et la veille technologique sur le retour d'expérience des installations vieillissantes, les matériaux, leurs dégradations et la modélisation de leurs propriétés.

---

## Annexes

---

**Annexe 1 : Fiches descriptives des méthodes d'interrogation d'experts**

**Annexe 2 : Classification des méthodes d'aide à la créativité selon leur logique de mise en œuvre**

**Annexe 3 : Document 1, Présentation de la démarche d'anticipation, son contexte et ses objectifs**

**Annexe 4 : Document 2, Informations pour l'anticipation**

**Annexe 5 : Document 3, Synthèse des résultats de la démarche d'anticipation**

**Annexe 6 : Liste EDF de mécanismes de dégradation et de modes de ruine**

**Annexe 7 : Liste EPRI de mécanismes de dégradation**

**Annexe 8 : Liste ISO/CD 14224 de mécanismes de dégradation et de modes de défaillance**

**Annexe 9 : Résultats de l'expertise pour l'évaluation de la pertinence**

**Annexe 10 : Résultats de l'expertise pour l'évaluation de la gravité**



# Annexe 1 : Fiches descriptives des méthodes d'interrogation d'experts



<h1>Méthode NUREG-1150</h1>	
Développée en <b>1987-1990</b>	
Par US-NRC, USA..	
<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>L'objet de cette méthode consiste à évaluer un état de connaissance d'événements, de variables ou de processus, lorsqu'on dispose de données incomplètes ou de modèles inadéquats. C'est une approche très structurée : elle inclut une phase d'entraînement des experts, une revue des discussions, des élicitations individuelles, l'agrégation des opinions et une revue finale par les experts.</p> <p>Dans l'approche NUREG-1150, chaque expert rédige un rapport sur l'étude. Après discussions entre les experts dans le cadre d'une élicitation collective, les estimations finales sont élicitées individuellement. Cette méthode est, dans la pratique, très utilisée (Voir la fiche NUREG-1150, paragraphe Applications) et a inspiré le développement de plusieurs autres méthodes (Voir les fiches « STUK-VTT », « CTN-UPM » et « TUD »).</p>
<b>Entrées</b>	L'expert dispose de données incomplètes ou de modèles inadéquats. On cherche à compléter l'information par expertise et à déterminer les incertitudes concernant les probabilités associées aux événements, variables ou processus de l'étude.
<b>Sorties</b>	Jugements quantitatifs sous forme de probabilités ou de distributions de probabilité qui reflètent le meilleur état de connaissances des événements, des variables ou des processus de l'étude.
<b>Méthode-phases</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Identification et sélection des objectifs.</li> <li>2- Identification et sélection des experts.</li> <li>3- Discussion et affinement des objectifs.</li> <li>4- Entraînement aux probabilités.</li> <li>5- Préparation à l'élicitation.</li> <li>6- Elicitation.</li> <li>7- Agrégation et résolution des opinions des experts.</li> <li>8- Documentation et communication des résultats.</li> </ol>
<b>Outils existants</b>	Guide de procédures
<b>Applications</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Evaluation Probabiliste de Sécurité pour des centrales nucléaires américaines.</li> <li>➤ Accidents sévères des réacteurs nucléaires, USA.</li> <li>➤ Risque environnemental résultant des déchets nucléaires : centres de stockage des déchets radioactifs.</li> <li>➤ Problèmes sismiques de sécurité.</li> <li>➤ Risques sanitaires liés aux gaz d'échappement des voitures .</li> </ul>

<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Réalisation facile</li> <li>➤ Résultats quantitatifs</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nécessité d'entraîner les experts aux notions de probabilités.</li> <li>➤ L'absence d'une technique formalisée pour l'élicitation individuelle.</li> <li>➤ L'absence d'une technique associée à l'élicitation collective des experts.</li> <li>➤ Il n'y a pas une évaluation de l'incertitude des connaissances des experts.</li> <li>➤ Il n'y a pas de valeurs probabilistes associées aux opinions des experts et leur incertitude.</li> </ul>
	<p><b>KEENEY, R.L., VON WINTERFELD, D.,</b> <i>On the Uses of expert judgement on Complex Technical Problems</i>, IEEE trans. Eng. Manag., Vol. 36, pp. 83-86, 1989.</p> <p><b>KEENEY, R.L. and al,</b> <i>Use of expert judgment in NUREG-1150</i>, Nuclear Engineering and Design, Vol. 126, pp. 313-331, North-Holland, 1991.</p> <p><b>EPEL, T., VON WINTERFELD, D.,</b> <i>Eliciting Experts Judgements to predict the outcomes of the FARO L-21 Experiment: The NUREG-1150 methodology.</i> With an Appendix containing individual reports prepared by the following substantive experts: R.M. Bilbao y Leon, G.C. Colombo, G.P. Dobson, D. Gryffroy, P. Meyer, O. Zuchuat. EC-JRC-ISIS/SMA 3250/97, Final Report Revised January, 1997.</p> <p><b>A. LANNOY, H. PROCACCIA ,</b> <i>L'utilisation du jugement d'experts en sûreté de fonctionnement</i>, Editions TEC &amp; DOC, Décembre, 2001.</p>

<h1>Méthode STUK-VTT</h1>	
Développée en 1997	
Par VTT Automation, STUK, <b>Finlande.</b>	
<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>La méthode était destinée à l'origine à être utilisée dans différents cas d'estimation quantitative de risque ou de fiabilité, en ingénierie et analyse économique, où de grandes incertitudes sont toujours présentes.</p> <p>La méthode est basée sur la représentation probabiliste des incertitudes. Les prévisions des experts sont exprimées sous la forme de distributions de probabilité. La combinaison de ces estimations est fondée sur les réseaux bayésiens. Grâce à l'utilisation des réseaux bayésiens, il est relativement aisé d'interroger les experts, même s'ils ne sont pas familiarisés avec les concepts probabilistes. Cette méthode est appliquée pour le traitement de phénomènes qui présentent une grande incertitude ou quand les données expérimentales sont insuffisantes ou manquantes. Cependant, même s'il n'y a pas de restriction sur l'applicabilité de la méthode, il vaut mieux l'appliquer pour des prévisions sur des paramètres quantitatifs.</p>
<b>Entrées</b>	➤ Données expérimentales disponibles (souvent insuffisantes ou incomplètes)
<b>Sorties</b>	➤ Prévisions quantitatives.
<b>Méthode-phases</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Formation des experts;</li> <li>2- Elicitation des estimations des experts: deux séances d'élicitation;</li> <li>3- Modélisation et combinaison des estimations des experts;</li> <li>4- Analyses de sensibilité;</li> <li>5- Discussion et retours de la part des experts;</li> <li>6- Documentation.</li> </ol>
<b>Outils existants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Guide de procédures.</li> <li>➤ Librairie d'exemples.</li> <li>➤ Un outil logiciel utilisé lors des séances individuelles d'élicitation pour la détermination des probabilités a priori et conditionnelles.</li> </ul>
<b>Applications</b>	➤ Sûreté des centrales nucléaires.
<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Souplesse</li> <li>➤ Résultats quantitatifs.</li> <li>➤ Possibilité d'être appliquée avec peu de ressources</li> </ul>

<b>Points faibles</b>	➤ Difficultés pour formuler les questions d'élicitation et déterminer les probabilités conditionnelles requises dans les modèles bayésiens quand le phénomène est complexe.
<b>Références</b>	<p><b>PULKKINEN, U., HOLMBERG, J.,</b> <i>A method for using expert judgement in PSA.</i> STUK-YTO-TR 129, 1997.</p> <p><b>PULKKINEN, U., HOLMBERG, J., VIROLAINEN, R.,</b> <i>BE-EJT: Results of the STUK team,</i> ISIS/SMA, 34-48/97. February, 1997.</p> <p><b>PULKKINEN, U., HOLMBERG, J., VIROLAINEN, R.,</b> <i>The Application of the VTT-STUK structured expert judgement method to predict the results of an fuel-coolant interaction experiment,</i> Benchmark Exercise in Expert Judgement Techniques in PSA Level 2 (BE-EJT), 147-161, 2000.</p> <p><b>SIMOLA, K., VIROLAINEN, R.,</b> <i>The STUK/VTT Expert Judgement Methodology and its Use in the Phase 2.</i> Benchmark Exercise in Expert Judgement Techniques in PSA Level 2 (BE-EJT), 205-208, 2000.</p>

<h1>Méthode NNC</h1>	
Développée en <b>1996</b>	
Approche fondée sur les principes et les procédures de qualité du NNC Quality Procedures and Engineering Manual, NNC Limited (société nucléaire indépendante du Royaume Uni), <b>U.K.</b>	
<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>C'est une approche fondée sur les principes et les procédures de qualité du NNC Quality Procedures and Engineering Manual (NNC Limited est une société nucléaire indépendante du Royaume Uni).</p> <p>S'appuyant sur les méthodes d'assurance qualité des sources d'information et des processus de résolution de problèmes, la méthode NNC est basée sur des estimations individuelles des experts.</p>
<b>Entrées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Données disponibles expérimentales et autres,</li> <li>➤ Niveau de connaissances concernant le phénomène,</li> <li>➤ Ressources humaines et autres ressources disponibles</li> </ul>
<b>Sorties</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Estimation finale de la valeur des paramètres,</li> <li>➤ Incertitudes.</li> </ul>
<b>Méthode-phases</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Identification et sélection de l'équipe d'experts : experts pour l'élicitation, experts pour l'évaluation et experts pour la validation .</li> <li>2- Choix de la documentation.</li> <li>3- Identification, description et décomposition des objectifs, collecte et analyse.</li> <li>4- Analyse de l'incertitude.</li> <li>5- Agrégation des informations et formulation des dernières estimations des valeurs des paramètres.</li> <li>6- Présentation des résultats sous forme d'une documentation.</li> <li>7- Evaluation et validation .</li> </ol>
<b>Outils existants</b>	Guide de procédures
<b>Applications</b>	Expérimentation L-24 du JRC-ISIS, FARO facility pour l'étude des interactions dans un accident de réacteur nucléaire.
<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Souplesse de l'approche,</li> <li>➤ Approche en équipe multi-disciplinaire,</li> <li>➤ Un jeu de procédures bien conçu,</li> </ul>
<b>Points faibles</b>	Pas de processus d'élicitation formel et rigoureux

<b>Références</b>	<p><b>COE, I. M.</b>, <i>The NNC methodology for making Expert Judgement</i>, EC-JRC final report of contract 11448-95911UK, 1996.</p> <p><b>COE, I. M.</b>, <i>The NNC Expert Judgement methodology and its use in the prediction of some results of the FARO L-24 test</i> in A. Mosleh and R.A. Bari (Eds.), Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 4, Proc., of the 4<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 13-18 September, 1998, New York City, USA, Springer-Verlag, London, 1998.</p> <p><b>COE, I. M., LECHMERE, J. TAYLOR, K.L.</b> , <i>FARO Test Parameter estimates using the NNC Expert Judgement methodology</i>, EC-JRC-ISIS/SMA 3247/97.</p>
-------------------	---

<h1>Méthode FEJ</h1>	
Développée en 1985	
Par l'autorité de sûreté nucléaire GRS, Allemagne.	
<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>La méthode FEJ (Formal Expert Judgement) a été développée en 1985 par l'autorité de sûreté nucléaire GRS en Allemagne. La méthode se base sur la décomposition de la question de départ en sous éléments. La quantification de l'état de connaissance de ces différents éléments permet de donner une incertitude quantitative de la réponse à la question globale. La méthode agrège les jugements sur les niveaux les plus bas de la décomposition et les propage à travers la décomposition pour arriver à une expression quantifiée de l'état des connaissances, au niveau de la sortie du modèle.</p> <p>La méthode nécessite le concours de plusieurs types d'experts. Deux types d'équipes sont distinguées :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- des équipes composées d'experts d'une même discipline ; dans ce cas, l'agrégation est faite uniquement au sein d'une même équipe,</li> <li>- des équipes composées d'experts interdisciplinaires ; dans ce cas, l'agrégation est faite entre les résultats agrégés fournis par les différentes équipes.</li> </ul>
<b>Entrées</b>	La question étudiée et ses décompositions (si elles existent).
<b>Sorties</b>	Une expression quantifiée de l'état des connaissances et de son incertitude.
<b>Méthode-phases</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Analyse de la question</li> <li>2- Sélection des experts</li> <li>3- Préparer la décomposition de la question</li> <li>4- Première réunion des experts</li> <li>5- Les experts choisissent leur première décomposition en lots de travail et font une première estimation quantitative</li> <li>6- Deuxième réunion des experts</li> <li>7- Elicitation des jugements pour chaque lot sous la forme de distributions de probabilité subjectives pour évaluer les estimations quantitatives requises dans la décomposition. Cette élicitation est réalisée en sessions individuelles avec les experts des équipes respectives. La documentation relative aux sessions est rédigée.</li> <li>8- Recombinaison des estimations pour chaque lot selon la décomposition choisie par les experts. Recombinaison des résultats des lots pour aboutir à la réponse à la question initiale.</li> <li>9- Troisième réunion des experts</li> <li>10- Agrégation et assemblage final de la documentation sur la réponse. Rapport diffusé aux experts.</li> </ol>
<b>Outils existants</b>	<p>Logiciel informatique</p> <p>Guide de procédures</p>

<b>Applications</b>	Evaluations Probabilistes de Sûreté pour des centrales nucléaires, comportement des aérosols, mécanique des structures, dispersion atmosphérique, estimation de conséquences d'accidents, ...
<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La faculté de quantifier l'effet combiné de pratiquement n'importe quel nombre d'incertitudes de sources différentes, comprenant l'incertitude liée à la variabilité des jugements d'experts.</li> <li>➤ La réduction du phénomène de biais issu d'une trop grande confiance, via l'utilisation de jugements d'experts et via la décomposition.</li> <li>➤ Les mesures de sensibilité sont disponibles presque par définition lors de l'application de la méthode.</li> </ul>
<b>Points faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Un grand nombre d'expert</li> <li>➤ Difficulté de la décomposition du problème initial.</li> <li>➤ Une forte complexité due à l'agrégation de différentes équipes d'experts (difficulté de modélisation, de temps de calculs,...)</li> <li>➤ Donc un coût élevé.</li> </ul>
<b>Références</b>	<p><b>HOFER, E., JAVERI, V., LOFFLER, H., STUWE, D.F.</b>, <i>A survey of expert opinion and its probabilistic Evaluation for Specific Aspects of the SNR-300 Risk study</i>, Nuclear technology, Vol. 68, pp. 180-225, 1985.</p> <p><b>HOFER, E.</b>, <i>On survey of Experts Opinion</i>, Nuclear Engineering and Design, Vol. 93, pp. 153-160, 1986.</p> <p><b>HOFER, E.</b>, <i>Application of Formal Expert Judgment to Forecast Experiments Related to the JRC FARO Facility</i>, ISIS/SMA 3247/97, European Commission, Joint Research Centre, Ispra, 1997.</p>

<h1>Méthode KEEJAM</h1>	
Développée en <b>1997</b>	
à JRC-ISIS en collaboration avec Università di Brescia et Università di Bologna, <b>Italie</b> .	
<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>Méthode à base de connaissances, KEEJAM , Knowledge Engineering methodology for Expert Judgement Acquisition and Modeling, s'appuie sur des techniques d'ingénierie des connaissances. Elle permet une modélisation des connaissances de l'expert. Elle permet également de modéliser le processus par lequel l'expert résout le problème posé.</p> <p>Cette approche fournit un support structuré à l'analyste (dans ce cas, l'ingénieur en gestion des connaissances), pour l'élicitation des connaissances et des stratégies de raisonnement de l'expert, pour la construction de modèles de connaissances et pour l'application de ces modèles aux résultats de l'expertise.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Domaine d'application.</li> <li>➤ Etude de la faisabilité.</li> <li>➤ Spécifications de la modélisation.</li> <li>➤ Différentes sources de connaissances.</li> <li>➤ Documentation standards.</li> <li>➤ Processus de contrôle qualité et d'assurance qualité.</li> <li>➤ Equipe projet</li> <li>➤ Plan de travail.</li> </ul>
<b>Sorties</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Formulation du jugement d'expert pour les problèmes étudiés et justification du processus de raisonnement des experts.</li> <li>➤ Documentation complète.</li> <li>➤ Certification qualité.</li> </ul>
<b>Méthode-phases</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Démarrage de l'étude.</li> <li>2. Conception : choix des techniques d'acquisition des connaissances et des techniques de traitement des incertitudes.</li> <li>3. Acquisition des connaissances et modélisation.</li> <li>4. Exploitation du modèle conceptuel.</li> <li>5. Synthèse et résultats.</li> </ol>
<b>Outils existants</b>	Guide de procédures
<b>Applications</b>	Etude de sûreté en cas d'accident de réacteur nucléaire : Expérimentation L-24 du JRC-ISIS, FARO facility pour l'étude des interactions dans un accident de réacteur nucléaire.

<p><b>Points forts</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Modélisation des connaissances des experts.</li> <li>➤ Modélisation du processus de raisonnement des experts.</li> <li>➤ Représentation de l'incertitude par des distributions de probabilité.</li> <li>➤ Intégration et évaluation des sources de connaissances.</li> </ul>
<p><b>Points faibles</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Complexité, coût élevé et long délai de réalisation.</li> <li>➤ Nécessite des experts pendant une longue période.</li> <li>➤ Nécessite de persuader les experts d'explicitier leur processus de raisonnement.</li> <li>➤ Manque de propositions concrètes et pratiques pour : l'acquisition du processus de raisonnement, l'acquisition des opinions et des connaissances des experts, l'agrégation des opinions d'experts.</li> </ul>
<p><b>Références</b></p>	<p><b>GUIDA, G., BARONI, P., COJAZZI, G., PINOLA L., SARDELLA, R.,</b> <i>Preliminary Requirements for a Knowledge Engineering approach to Expert Judgement Elicitation in Probabilistic Safety Assessment</i>, in P.C Cacciabue I.A. Papazoglou (Eds.), Probabilistic Safety Assessment and Management, ESREL '96-PSAM III, June 24-28, 1996 Crete, Greece, Springer-Verlag, London, UK, 1996.</p> <p><b>COJAZZI, G., BARONI, P., GUIDA, G., PINOLA L., SARDELLA, R.,</b> <i>A Knowledge Engineering Methodology for Expert Judgement Acquisition and Modeling in Probabilistic Safety Assessment</i>, in advances in Safety and reliability, C; Guides Soares Ed., Proc. Of the ESREL '97 International Conference on Safety and Reliability, Lisbon, Portugal, Pergamon, June 17-20, 1997.</p> <p><b>COJAZZI, G., GUIDA, G., PINOLA L.,</b> <i>KEEJAM Expert Judgement Methodology and its application to the Prediction of the results of a Fuel Coolant Interaction Experiment</i>, in A. Mosleh and R.A. Bari (Eds.), Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 4, Proc., of the 4<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 13-18 September, 1998, New York City, USA, Springer-Verlag, London, 1998.</p>

<h1>Méthode CTN – UPM</h1>	
Développée en <b>1997</b> .	
Par Departamento de Ingenieria Nuclear, Universidad Politécnica de Madrid, <b>Espagne</b> .	
<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>Cette méthode a été développée sur les bases de la méthode NUREG-1150. Cependant, il existe une grande différence entre les deux méthodes par rapport à la façon d'agrèger les opinions d'experts.</p> <p>Le protocole CTN a été développé afin d'estimer des probabilités subjectives de paramètres inconnus et d'évènements incertains. Il consiste en neuf étapes réalisées de manière séquentielle.</p>
<b>Entrées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Informations disponibles.</li> <li>➤ Sources d'informations concernant l'utilisation du jugement d'experts dans des cas similaires.</li> </ul>
<b>Sorties</b>	Probabilités quantifiées.
<b>Méthode-phases</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sélection de l'équipe de travail;</li> <li>2. Définition des questions à étudier;</li> <li>3. Sélection des experts;</li> <li>4. Session d'entraînement;</li> <li>5. Définition des tâches;</li> <li>6. Travail individuel des experts;</li> <li>7. Session d'élicitation;</li> <li>8. Analyse et agrégation des résultats;</li> <li>9. Documentation.</li> </ol>
<b>Outils existants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Guide de procédure.</li> </ul>
<b>Applications</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Projet financé par l'autorité de sûreté nucléaire espagnole.</li> <li>➤ Sûreté nucléaire : la mise en place et la première application de cette méthode sont l'exercice de comparaison des méthodes d'interrogation d'experts. (BE-EJT).</li> </ul>
<b>Points forts</b>	Phase d'agrégation facile à adapter.
	Méthode encore expérimentale.
<b>Références</b>	<b>IBANEZ, J., BOLADO, R.,</b> <i>The CTN-UPM Expert Judgement Methodology and its use in the phase 2. Benchmark Exercise in Expert Judgement Techniques in PSA Level 2 (BE-EJT), 209-212, 2000.</i>

# TUD, guide européen pour l'interrogation structurée d'experts

Développée en 1996

par l'Université de Technologie de Delft, **Pays-Bas**.

<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>Il s'agit d'un guide européen pour jugement d'experts en analyse d'incertitude.</p> <p>C'est un ensemble de procédures à appliquer dans une interrogation d'experts afin de déterminer des distributions de probabilités pour une analyse d'incertitude. Dans ce domaine d'application, les méthodes développées à l'Université de Delft ont bénéficié des expériences en jugement d'experts réalisées aux Etats-Unis avec la méthode NUREG-1150. Le guide de procédures est une synthèse de l'ensemble de ces méthodes.</p>
<b>Entrées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Variables Cibles : variables à quantifier</li> <li>➤ Variables de requêtes : variables intermédiaires servant à déterminer les variables cibles.</li> <li>➤ Variables de performance : variables permettant d'estimer la fiabilité des résultats obtenus.</li> </ul>
<b>Sorties</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Des distributions d'incertitudes sur les variables pour une analyse d'incertitude.</li> </ul>
<b>Méthode-phases</b>	<p><b>Préparation pour élicitation</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1- Définition du cas d'étude</li> <li>2- Identification des variables cibles</li> <li>3- Identification des variables de requêtes</li> <li>4- Identification des variables de performance</li> <li>5- Identification des experts</li> <li>6- Sélection des experts</li> <li>7- Définition du format du document d'élicitation</li> <li>8- Exercice d'élicitation</li> <li>9- Cession d'entraînement des experts</li> </ol> <p><b>Elicitation</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>10- Cession d'élicitation des experts</li> </ol> <p><b>Post-Elicitation</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>11- Combinaison des avis d'experts</li> <li>12- Etude de robustesse de l'analyse</li> <li>13- Retour des résultats de l'expertise auprès des experts</li> <li>14- Analyse et validation</li> <li>15- Documentation.</li> </ol>
<b>Outils existants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Guide de procédures</li> </ul>

<b>Applications</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Utilisable en analyse d'incertitude</li><li>➤ Ce guide est recommandé par RIPBR (voir fiche « RIPBR »)</li></ul>
<b>Points forts</b>	Méthode bien structurée
<b>Points faibles</b>	Application coûteuse en temps d'expertise.
<b>Références</b>	<p><b>L. J. H. Goossens, R. M. Cooke</b>, <i>Procedure guide for the use of expert judgment in uncertainty analysis</i>, Probabilistic Safety Assessment and Management '96 ESREL '96 and PSAM-III, Springer-Verlag, London, June 24-28, 1996.</p> <p><b>R. M. Cooke, L. J. H. Goossens</b>, <i>Procedures guide for structured expert judgment</i>, <i>Nuclear Science and Technology</i>, European Commission, 2000.</p>

<h1>Approche LCM</h1>	
Développée à la fin des années 1990	
Par EPRI, USA.	
<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>C'est une méthode pour la gestion du cycle de vie des matériels des centrales nucléaires. LCM permet la gestion du vieillissement et de l'obsolescence des systèmes, structures et composants les plus importants pour la durabilité.</p> <p>Cette approche fournit aussi une solution optimale pour la gestion du cycle de vie du matériel sur la base d'une comparaison technico-économique entre différentes solutions possibles. Elle permet de maximiser la valeur de la tranche nucléaire (en réduisant les coûts) tout en assurant le niveau de sûreté. Le rôle de l'expert est, entre autres, de fournir les options possibles pour la gestion du cycle de vie et leurs caractéristiques. L'interrogation d'expert est très guidée sous forme de logigrammes. L'expert est en permanence guidé.</p>
<b>Entrées</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Informations concernant la centrale étudiée, l'historique d'exploitation,</li> <li>2- Le retour d'expérience de défaillance</li> <li>3- Données de conception du matériel étudié.</li> <li>4- Historique de maintenance (corrective) du matériel étudié.</li> <li>5- Inventaire des tâches de maintenance préventive du matériel étudié.</li> <li>6- Données économiques et financières : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix de l'électricité</li> <li>• Taux d'inflation</li> <li>• Coûts de main d'œuvre</li> <li>• Coût de maintenance du matériel étudié</li> </ul> </li> </ol>
<b>Sorties</b>	Evaluation économique et plan de gestion de cycle de vie pour les plus importants systèmes, structures et composants d'une tranche nucléaire.
<b>Méthode-phases</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Identification des ressources pour le planning LCM.</li> <li>2- Identification des sources de données et des bases de données disponibles.</li> <li>3- Collecte des informations spécifiques à la tranche étudiée.</li> <li>4- Comparaison des données spécifiques et des conditions de fonctionnement de la tranche étudiée aux données génériques.</li> <li>5- Identification des mécanismes et des conditions de vieillissement spécifiques à la tranche étudiée.</li> <li>6- Comparaison et évaluation des situations d'obsolescence dans la tranche.</li> <li>7- Corriger les écarts de la tranche par rapport aux différentes situations génériques.</li> <li>8- Collecte des données pour l'évaluation économique</li> <li>9- Rédaction des conclusions pour l'aide à la prise de décisions.</li> <li>10- Planning LCM de la tranche et des systèmes, structures et composants étudiés.</li> </ol>

<b>Outils existants</b>	composant important.
<b>Applications</b>	Elaborations de plans de gestion de cycle de vie pour des centrales nucléaires américaines (Oconee, Prairie Island, ...)
<b>Points forts</b>	Permet d'assurer la sûreté des installations à moindre coût grâce à une évaluation économique des différentes solutions possibles.
<b>Points faibles</b>	L'identification des mécanismes de vieillissement se base sur des situations génériques et laisse peu de place à l'anticipation de nouveaux mécanismes potentiels.
<b>Références</b>	<p><b>G. SLITER et al</b>, <i>Life Cycle Management planning for important nuclear power plant systems, structures and components</i>, ICON 8, Baltimore, 02-04 Avril, 2000.</p> <p><b>A. MELVIN and al</b>, <i>Demonstration of Life Cycle Management Planning for Systems and Components with Pilot Applications at Oconee and Prairie Island Nuclear Stations</i>, document interne EPRI confidentiel, 2001.</p> <p><b>G. SLITER, F. GREGOR, D. LEHNERT et al</b>, <i>Demonstration of life cycle management planning for systems, structures and components-- with pilot applications at Oconee and Prairie Island nuclear stations</i>, rapport interne EPRI 1000806 confidentiel, Janvier, 2001.</p> <p><b>G. SLITER, F. GREGOR</b>, <i>Life cycle management planning sourcebooks - Overview report</i>, rapport interne EPRI 1003058 confidentiel, Décembre, 2001.</p> <p><b>G. SLITER</b>, <i>Life cycle management in the US nuclear power industry</i>, SMIRT 17, Prague, 17-22 Août, 2003.</p>

<h1>Approche TRIZ-AFD</h1>	
Développée en 1997	
Par <b>S. KAPLAN</b> aux USA.	
<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>C'est une méthode d'identification et d'analyse des défaillances à partir des fondements de la méthode de résolution de problème et d'aide à l'innovation TRIZ. TRIZ-AFD ( Anticipatory Failure Determination) a été développée récemment aux Etat-Unis.</p> <p>L'AFD se décompose en deux outils : l'AFD 1 et l'AFD 2. L'AFD 1 est destinée à l'analyse des causes d'une défaillance survenue. L'AFD 2 reprend les grandes étapes de l'AFD 1, complétées par un grand nombre d'étapes dédiées à une dynamique de créativité plus étendue.</p>
<b>Entrées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Description du système étudié</li> <li>➤ Description des défaillances étudiées</li> </ul>
<b>Sorties</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Les causes de défaillances</li> <li>➤ Les événements non souhaités</li> <li>➤ Les solutions préventives</li> </ul>
<b>Méthode-phases</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Formuler le problème original</li> <li>2- Identifier le scénario de succès</li> <li>3- Localiser la défaillance : événements initiateur et conséquences de la dégradation ou de la défaillance</li> <li>4- Formuler et amplifier le problème inversé afin de stimuler la créativité de l'expert</li> <li>5- Rechercher les solutions apparentes et évidentes</li> <li>6- Formuler des hypothèses ; comprendre, par des essais ou des calculs, le processus de dégradation ou de défaillance afin d'expliquer les causes possibles.</li> <li>7- Eviter les défaillances : trouver des mesures préventives contre les défaillances</li> </ol>
<b>Outils existants</b>	Deux logiciels AFD1 et AFD2 s'appuyant sur des bases de connaissances nécessaires pour le déploiement de la méthode.
<b>Applications</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Recherche des causes de défaillances</li> <li>➤ La prévision d'événements non souhaités</li> <li>➤ L'élaboration de solutions préventives</li> </ul> <p>Potentiellement applicable à l'étude de dangers technologiques, naturels, organisationnels,...</p>

<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Apprentissage aisé des outils d'application de la méthode.</li> <li>➤ L'apport des bases de connaissances de l'outil et l'intégration des notions fondamentales de TRIZ concourent à l'élaboration d'hypothèses plausibles, de solutions et de parades.</li> </ul>
<b>Points faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La formulation du problème, étape fondamentale de l'analyse n'est pas décrite.</li> <li>➤ Certaines notions ne sont pas bien définies : la description du système étudié,...</li> <li>➤ Le processus systématique d'analyse des paramètres peut générer un domaine d'exploration trop étendu selon la complexité du problème.</li> <li>➤ Les modalités de mise en œuvre concrète des étapes correctives (AFD1) et préventives (AFD2) ne sont pas décrites.</li> <li>➤ Aide logicielle rudimentaire.</li> </ul>
<b>Références</b>	<p><b>KAPLAN. S.</b> <i>Anticipatory Failure Determination</i>, Proceeding of the 9<sup>th</sup> Annual QFD Symposium, 1997.</p> <p><b>KAPLAN. S., VISNEPOLSCHI S., ZLOTIN. B., ZUSMAN. A.,</b> <i>New tools for failure and risk analysis- An introduction to Anticipatory Failure Determination (AFD) and the Theory of Scénario Structuring</i>, Ideation International Inc., 1999.</p> <p><b>HAIK. P., GUARNIERI. F.,</b> <i>AFD, une nouvelle méthode pour l'identification et la maîtrise des défaillances : présentation, illustration et perspective</i>. Proceedings of the conferences of ESREL 2002, Lambda mu 13, 2002.</p>

<h1>Approche RIPBR</h1>	
Développée en 1995	
Par Department of Nuclear Engineering, MIT, USA.	
<b>Contexte, objectifs et caractéristiques</b>	<p>Contrairement aux méthodes classiques dites « prescriptives » qui dressent des listes de consignes ou de recommandations à respecter pour la sûreté nucléaire de manière systématique ; la méthode RIPBR permet d'établir un compromis entre l'amélioration de la sûreté et la réduction des coûts.</p> <p>Cette recherche de compromis est faite sur la base d'expertise. Cette méthode permet une meilleure compréhension des modes de défaillance et des mécanismes de dégradation, une meilleure estimation des taux de défaillances avec leurs incertitudes. Cependant c'est une approche encore en évolution. Elle recommande le guide de procédures pour jugement structuré d'experts (voir fiche « guide de procédures pour jugement structuré d'experts »)</p>
<b>Entrées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Programmes de maintenance effectivement appliqués</li> <li>➤ Programmes de maintenance exigés par les autorités de sûreté</li> <li>➤ Programme de maintenance appliqués chez d'autres exploitants (retour d'expérience analogue)</li> <li>➤ Données de défaillances du site étudié</li> </ul>
<b>Sorties</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Solutions proposées pour l'amélioration de la performance (sûreté ou coût)</li> <li>➤ Changements à mettre en œuvre.</li> <li>➤ Eléments pour la quantification des paramètres de sûreté de fonctionnement et de leurs incertitudes.</li> </ul>
<b>Méthode-phases</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Identification et description du changement à introduire</li> <li>2- Analyse du changement proposé : par expertise et par PRA (Probabilistic Risk Assessment).</li> <li>3- Description de la mise en œuvre du changement proposé.</li> <li>4- Mise en place effective du changement proposé.</li> </ol>
<b>Outils existants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Guide de procédures</li> <li>➤ Logiciels de calcul PRA (Probabilistic Risk Assessment)</li> <li>➤ Guide de procédures pour jugement structuré d'experts</li> </ul>
<b>Applications</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Optimisation de la performance en sûreté nucléaire ( projet « maintenance rule », US-NRC).</li> <li>➤ Optimisation des tests de confinement nucléaire, US-NRC.</li> </ul>

<b>Points forts</b>	Méthode orientée vers une amélioration de la performance grâce à une recherche d'un équilibre entre les efforts de sûreté et la maîtrise des coûts.
<b>Points faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Manque de données et de compréhension concernant les mécanismes de dégradation et les taux de défaillance des composants.</li><li>➤ Besoins d'anticipation des défaillances potentielles pour valider ou envisager des cycles de surveillance plus longs.</li><li>➤ Difficulté pour le traitement des incertitudes concernant les taux de défaillance.</li><li>➤ Difficultés pour la modélisation et de l'intégration du facteur humain.</li></ul>
<b>Références</b>	<p><b>M.W. GOLAY</b>, <i>Improved nuclear power plant operations and safety through performance-based safety regulation</i>, Journal of Hazardous Materials, Vol. 71, pp. 219-237, 2000.</p> <p><b>M. DEY</b>, <i>Performance-oriented and risk-based regulation for containment testing</i>, Nuclear Engineering and Design, Vol. 166, pp. 305-509, 1996.</p> <p><b>R. M.COOKE, L. J. H. GOOSSENS</b>, <i>Procedures guide for structured expert judgment</i>, Project report, nuclear science and technology, European Commission, 2000.</p>

<h1>Approche PMDA-PIRT</h1>	
en cours de développement depuis 2003	
par l'autorité de sûreté nucléaire américaine l'US-NRC (Nuclear Regulatory Commission).	
<b>Caractéristiques</b>	C'est une approche d'anticipation des mécanismes de dégradation impliqués dans le vieillissement des composants des centrales nucléaires.
<b>Entrées</b>	Informations existantes sur les matériels critiques des centrales nucléaires américaines et leur défaillances.
<b>Sorties</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- identifier et hiérarchiser des mécanismes de dégradation susceptibles d'affecter les matériels critiques des centrales,</li> <li>- évaluer l'efficacité des inspections périodiques, ou mettre en œuvre des nouvelles procédures de maintenance corrective ou de remplacement,</li> </ul> <p>aussi potentiels.</p>
<b>Méthode-phases</b>	<p><b>PIRT</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1- La problématique : anticipation des mécanismes de dégradation potentiels pour les centrales nucléaires.</li> <li>2- Les objectifs : identification des matériels critiques des centrales PWR et BWR, identification des mécanismes de dégradation relatifs à chaque matériel et classification de ces mécanismes.</li> <li>3- Collecte, évaluation et utilisation des informations existantes</li> <li>4- Installations et scénarios : identification des systèmes et des matériels critiques et description pour chaque matériel des conditions d'exploitation, matériaux, milieu, ... Un matériel et l'ensemble des informations le concernant forment un scénario.</li> <li>5- Critères d'évaluation <ol style="list-style-type: none"> <li>a- quelle est la probabilité d'occurrence de la dégradation</li> <li>b- à quel âge de l'installation la dégradation va-elle s'amorcer ?</li> <li>c- quelle est la probabilité de fissure après l'amorçage</li> </ol> </li> <li>6- Identification des mécanismes <ul style="list-style-type: none"> <li>-identification d'une liste globale (Master list) de mécanismes de dégradation</li> <li>-Association d'un ou plusieurs mécanismes aux composants critiques</li> <li>-Justification de l'association</li> </ul> </li> <li>7- Classification des mécanismes selon les critères d'évaluation</li> <li>8- Évaluation des connaissances</li> <li>9- Documentation</li> </ol> <p><b>PMDA-PIRT</b></p> <p>L'élicitation s'organise en 6 réunions collectives, qui durent chacune 1 semaine. Quatre semaines séparent les réunions collectives, dont deux semaines de travail sur l'approche.</p>
<b>Outils existants</b>	Documentation PIRT
<b>Applications</b>	Application en cours pour les centrales nucléaires américaines.

<b>Points forts</b>	Cette démarche permet d'anticiper des mécanismes de dégradation impliqués dans le vieillissement des composants des centrales nucléaires. Elle permet d'établir un compromis entre l'amélioration de la sûreté et la réduction des coûts.
<b>Points faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PMDA-PIRT traite, lors d'une même procédure, de l'ensemble des matériels critiques d'une installation. Ceci implique de grands efforts de mise en œuvre et remet en cause l'efficacité des réunions collectives. D'une part, le choix des experts qui pourraient maîtriser l'ensemble des matériels critiques n'est pas évident. D'autre part, traiter lors d'une seule réunion l'identification des mécanismes de dégradation potentiels pour un ensemble des matériels critiques semble une tâche lourde et difficile à réaliser de manière pertinente.</li> <li>- Cette méthode est en cours de développement depuis 2003 et il n'y a donc pas de retour pour l'instant sur son application et sur son efficacité.</li> </ul>
<b>Références</b>	<p>[NRC, 2004a] <b>Office of Nuclear Regulatory Research</b>, <i>1<sup>st</sup> Meeting of the Proactive Materials Degradation Assessment (PMDA) Expert Panel</i>, Nuclear Regulatory Commission, août, 2004.</p> <p>[NRC, 2004b] <b>Office of Nuclear Regulatory Research</b>, <i>2<sup>nd</sup> Meeting of the Proactive Materials Degradation Assessment (PMDA) Expert Panel</i>, Nuclear Regulatory Commission, octobre, 2004.</p>



## Annexe 2 : Classification des méthodes d'aide à la créativité



## Annexe 2 : Classification des méthodes d'aide à la créativité selon leur logique de mise en œuvre

[Vadcard, 1996]

<b>Logique associative</b>	<b>Logique analogique</b>	<b>Logique combinatoire</b>	<b>Logique onirique</b>	<b>Logique aristotélicienne</b>
1. Brainstorming	17. Approche analogique	4. Scénarios	4. Scénarios	5. Carte mentale
2. Concassage	18. Synectique	13. Matec	11. Baguette magique	6. Techniques des six chapeaux
3. Mots inducteurs	19. Bionique	22. Matrice de découverte	23. Rêve éveillé	7. Techniques des quatre métiers
4. Scénarios	20. Portrait chinois		24. 3 i	9. Portrait en creux
5. Carte mentale	21. Troubetzkoï		25. Identification	27. Purge
6. Techniques des six chapeaux			26. Mimodrame	28. Martien (ou l'Enfant)
7. Techniques des quatre métiers				29. Lipogramme
8. Inversion				30. Reformulation
9. Portrait en creux				31. Analyse défectuelle
10. Brainwriting				32. Diagramme des relations
11. Baguette magique				33. Fiche idée
12. Roue libre				34. Avocat de l'ange
13. Matec				35. Arbre de pertinence
14. Jeu phonétique				36. Tableau d'évaluation objective
15. Méthode KJ				37. QQQQCP : Qui ? Quoi ? Ou ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?
16. Diagramme causes-effets				



**Annexe 3 : Document 1, Présentation de la  
démarche d'anticipation, son contexte et ses  
objectifs**



# AVISE : une démarche d'Anticipation du Vieillessement par Interrogation et Stimulation d'Experts

*Application au pressuriseur des centrales 900 MWe et à sa ligne  
d'expansion pour 60 ans d'exploitation*

Document 1 : « Présentation de la démarche  
d'anticipation, son contexte et ses objectifs »

Coordinateur : Leïla BOUZAÏENE

E-Mail : [leila@lgi.ecp.fr](mailto:leila@lgi.ecp.fr)

Novembre 2003 (Mise à jour en Janvier 2005)



## 1. Matériel étudié et limites de l'application

Il s'agit du pressuriseur et de sa ligne d'expansion pour les tranches nucléaires 900 MWe. Le piquage et la buse d'aspersion rentrent dans le cadre de l'application, le reste du circuit d'aspersion est exclu. Les cannes chauffantes qui se trouvent à l'intérieur du pressuriseur sont également écartées de l'étude. En effet, il s'agit de composants consommables dont la défaillance ne remet pas en cause la durée d'exploitation du pressuriseur. Les soupapes de sûreté et le circuit associé sont aussi exclus de l'étude.

## 2. Contexte de l'application

Cette démarche rentre dans le cadre de la gestion du cycle de vie des installations et de l'étude de durabilité qui visent à évaluer la possibilité de prolonger la durée d'exploitation des tranches nucléaires REP de 40 à 60 ans.

Cette prolongation soulève alors deux questions fondamentales :

- Quel est l'impact du vieillissement à l'horizon de 60 ans sur les installations compte-tenu de leur état actuel et des politiques d'exploitation et de maintenance ?
- Quels sont les coûts engendrés par une telle prolongation ?

Pour répondre à la première question, il faut identifier les défaillances potentielles dues au vieillissement qui pourraient affecter les systèmes, les structures ou les composants de ces installations, juger de leur criticité et de leur conséquences et évaluer ainsi leur impact sur le vieillissement. Pour les défaillances jugées critiques, il faut alors mettre en place les mesures adéquates pour les éviter ou pour les retarder. On appelle ce processus *anticipation du vieillissement*. Nous donnons à l'anticipation la définition suivante :

### *Définition*

**L'anticipation** est l'identification des événements, potentiellement pénalisants en termes de sûreté, de disponibilité ou de coûts, avant qu'ils ne se produisent, afin d'évaluer les risques qu'ils présentent et de préparer et mettre en œuvre les mesures ou les parades adéquates.

### *Définition*

**Le vieillissement** est un processus par lequel les caractéristiques d'un matériel se modifient par le temps ou l'utilisation [EPRI, 1993].

Afin d'anticiper des défaillances potentielles dues au vieillissement, il faut identifier d'abord les mécanismes de dégradation qui sont à l'origine de ces défaillances.

### Définition

Un **mécanisme de dégradation** est une altération physico-chimique des caractéristiques d'un matériau dans des conditions particulières de température, de pression et dans un milieu chimique particulier [EPRI, 1993].

Ainsi, pour réaliser cette anticipation nous proposons le processus suivant, en plusieurs étapes :

- 1- Identification des mécanismes de dégradation potentiels,
- 2- Étude de la pertinence de ces mécanismes à 60 ans,
- 3- Analyse et hiérarchisation des mécanismes de dégradation : les modes ou effets du vieillissement potentiels, les conséquences et leurs gravité en terme de de sûreté, de coûts, d'indisponibilité, de dosimétrie et d'image.
- 4- Identification et évaluation des parades potentielles.

On remarque que ce processus amène à un choix de solutions pertinentes qui peuvent assurer le bon fonctionnement des installations pour leur nouvelle durée d'exploitation. Ces solutions peuvent être les données d'entrée d'un modèle d'évaluation technico-économique.

### 3. Présentation de la démarche

Le processus d'anticipation s'intègre dans une démarche globale d'anticipation, intitulée AVISE, Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts. La structure de cette démarche d'anticipation est donnée par la figure 1 suivante :

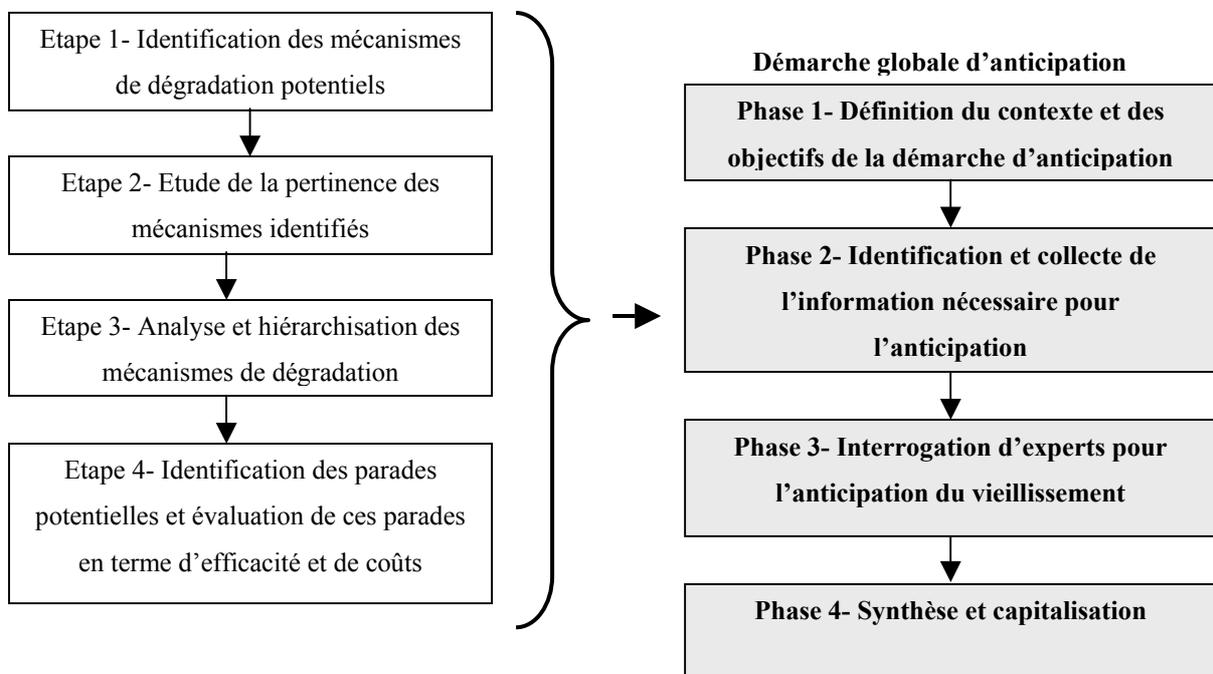


Figure 1 : Structure de la démarche d'anticipation.



Afin d'aider l'expertise, l'analyste a collecté et rassemblé un certain nombre de données qui peuvent s'avérer utiles : l'analyse fonctionnelle, le retour d'expérience, les données de conception,... Ces données sont présentées dans **le document 2 : les informations nécessaires pour l'anticipation**. La pertinence de ces informations a été validée par un expert du matériel.

Certains experts, disposant d'autres données utiles, peuvent les porter à la connaissance de l'analyste. Ces données seront intégrées dans le document 2. Les informations complémentaires nécessaires pour l'anticipation, qualitatives ou quantitatives seront données par expertise.

Les compétences des experts et les types d'entretiens sont résumés dans le tableau suivant :

<b>Etape</b>	<b>Type d'entretien</b>	<b>Experts</b>
<b>Etape 1-</b> Identification des mécanismes de dégradation potentiels	Réunion collective	Experts matériaux Experts cycle de vie
<b>Etape 2-</b> Étude de la pertinence de ces mécanismes à 60 ans	Entretiens individuels	Experts matériaux (Experts cycle de vie, si possible)
<b>Etape 3-</b> Analyse et hiérarchisation des mécanismes potentiels (modes ou effets du vieillissement, conséquences, gravité)	Entretiens individuels	Experts matériaux Experts cycle de vie
<b>Etape 4-</b> Identification et évaluation des parades potentielles pour les mécanismes critiques	Réunion collective	Experts cycle de vie (particulièrement les experts maintenance)

L'expert répond, dans la mesure où il le peut, à la question posée soit de façon qualitative soit de façon quantitative. L'analyste intégrera toutes les réponses et éventuellement, si les divergences entre les experts sont trop importantes, pourra se trouver dans l'obligation de procéder à un nouvel entretien, de confirmation ou de validation. Dans tous les cas une synthèse de l'entretien parviendra à l'expert.

## Annexe 4 : Document 2, Informations pour l'anticipation



# AVISE : une démarche d'Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts

*Application au pressuriseur des centrales 900 MWe et à sa ligne  
d'expansion pour 60 ans d'exploitation*

Document 2 : « Informations pour l'anticipation »

Coordinateur : Leïla BOUZAÏENE

E-Mail : leila@lgi.ecp.fr

Mars 2004 (Mise à jour en Janvier 2005)



# Table des matières

## 1. Typologie des informations relatives au matériel

## 2. Principales sources d'informations pour le matériel étudié : le pressuriseur

## 3. Informations collectées pour le pressuriseur

3.1 Les données de conception

3.2 Les données relatives aux matériaux

3.3 Les données fonctionnelles

3.4 Les paramètres de fonctionnement

3.5 Les données d'environnement

3.6 Les données d'exploitation

3.7 Les données de maintenance

3.8 Les données de retour d'expérience

3.9 Les données de fiabilité

## 4. Les annexes

Annexe 4.1 : Schémas techniques du pressuriseur et des différents tracés de la ligne d'expansion LEP

Annexe 4.2 : Liste et affectation des pressuriseurs 900 MWe

Annexe 4.3 : Les caractéristiques mécaniques et chimiques des matériaux

Annexe 4.4 : Les caractéristiques des principales opérations de soudage et de revêtement

Annexe 4.5 : Classification de la qualité de fabrication des soudures des pressuriseurs en exploitation (REX)

Annexe 4.6 : Le découpage matériel

Annexe 4.7 : Les spécifications chimiques du milieu primaire et le hors spécifications

Annexe 4.8 : Comptabilisation des situations du pressuriseur

Annexe 4.9 : Les contrôles des différentes zones et soudures du pressuriseur et de la LEP

Annexe 4.10 : Analyse du REX SAPHIR

Annexe 4.11 : Retour d'expérience étranger : événements importants

Annexe 4.12 : Retour d'expérience analogue

Annexe 4.13 : Problèmes potentiels concernant le pressuriseur à l'horizon de 60 ans (EDF projet durabilité)

Annexe 4.14 : AMDE pressuriseur suivant le GALL

Annexe 4.15 : Les facteurs d'usage

# 1- Typologie des informations relatives au matériel

Les données de retour d'expérience ne constituent qu'une petite partie des données relatives au matériel. Ces données peuvent être regroupées en deux ensembles :

**1.1 Les données intrinsèques** sont celles relatives à la constitution du matériel. Dans ces données on retrouve :

**- Les données de conception**

Ces données concernent tous les éléments relatifs à la conception du matériel. Elles regroupent les composants du matériel, les schémas techniques, les dimensions géométriques des différents composants, les procédures de fabrication et les différents coûts.

**- Les données relatives aux matériaux**

Ces données concernent les différents matériaux qui constituent le matériel. Elles regroupent les caractéristiques chimiques et mécaniques de ces matériaux, leurs propriétés et une description des soudures du matériel (s'il y a lieu).

**- Les données fonctionnelles**

Ce sont les fonctions globales du matériel et sa décomposition en groupes de composants accomplissant une même fonction.

**2.2 Les données extrinsèques** sont celles relatives à l'environnement du matériel. Dans ces données on retrouve :

**- Les paramètres de fonctionnement**

Les paramètres de fonctionnement regroupent les températures, les pressions, les débits.

**- Les données d'environnement interne ou externe**

Les données d'environnement concernent les milieux chimiques interne (fluide véhiculé, ...) ou externe dans lesquels évolue le matériel et ses interactions avec les matériels environnants.

**- Les données d'exploitation**

Ces données décrivent les différents régimes d'exploitation du matériel, le nombre d'heures de fonctionnement, le nombre de sollicitations, les temps en régime permanent, les démarrages/arrêts les transitoires d'exploitation, leur nombre et leur amplitude.

**- Les données de maintenance**

Les données de maintenance sont les programmes de maintenance préventive. Mais ce sont aussi les différents coûts de maintenance, les données concernant l'obsolescence (ou vieillissement technologique) et la réglementation.

**- Les données de retour d'expérience**

Ces données regroupent le retour d'expérience de l'entreprise, le retour d'expérience analogue (voir paragraphe 4.2.3, p 85) et celui des partenaires ou des concurrents; ainsi que les rapports de veille technologique.

**- Les données de fiabilité**

Elles regroupent les facteurs d'usage et les rapports de sûreté, de fiabilité et de vieillissement.

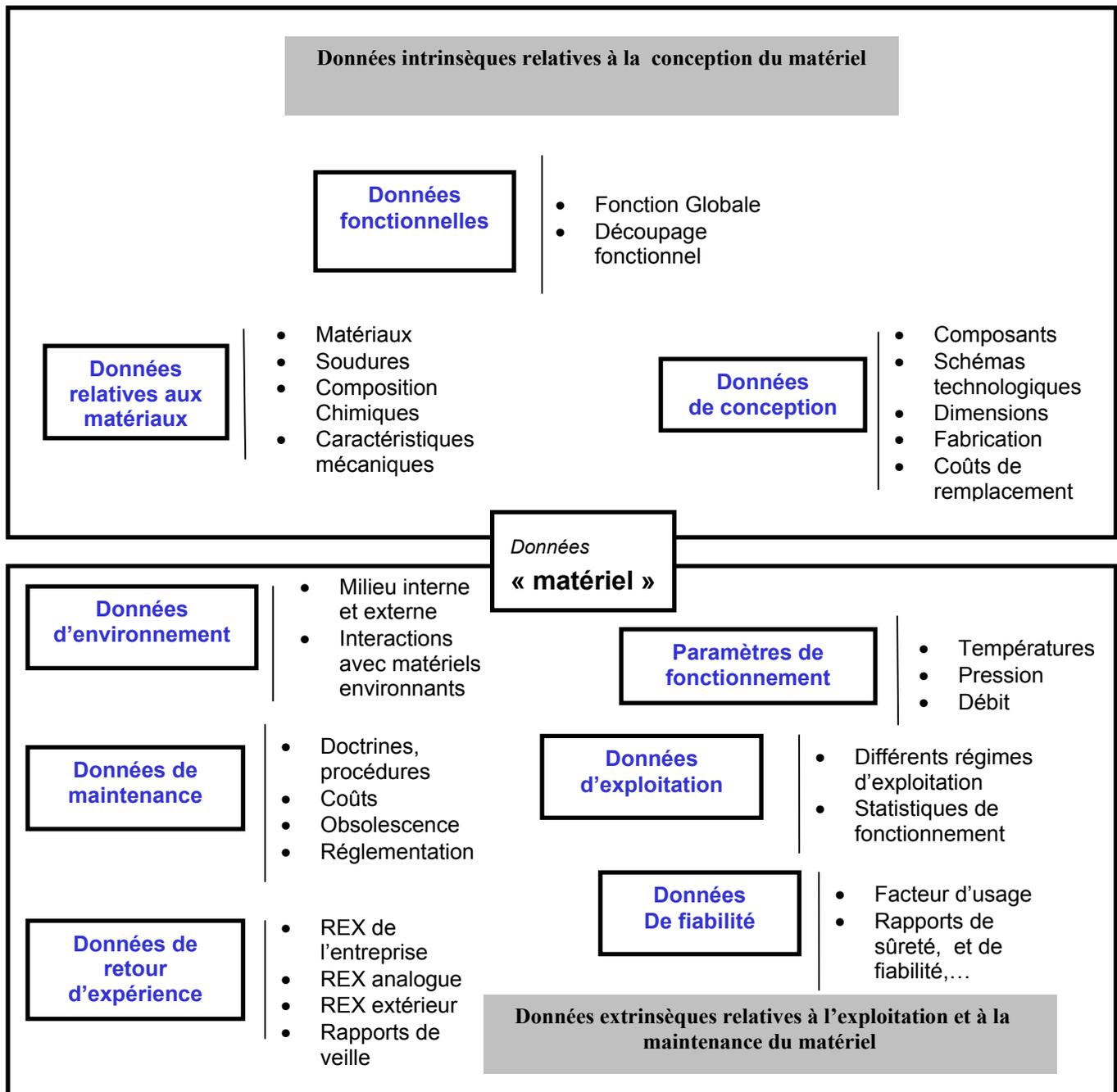


Figure 1 : L'ensemble des données relatives au matériel.

## 2- Principales sources d'informations pour le matériel étudié : le pressuriseur

- Données brutes de retour d'expérience : REX SAPHIR
- Découpage matériel du pressuriseur.
- Notice technique sur les centrales nucléaires P.W.R : Fascicule N° 325 Pressuriseur, EDF.
- Comptabilisation des situations 900 MWe et marges mécaniques en fatigue dans une optique de durée de vie du CPP-CSP, revue technique du 29 avril 2002, ref . E-N-ES-RE/02-05069, SEPTEN, EDF, 2002.
- Etude de faisabilité de remplacement du pressuriseur, note d'étude ref. E-M-E-CM/00-0206, EDF, 2000.
- [Amblard et Prat, 1998] M.N. Amblard, J. Prat, *Pressuriseur : Dossier technique à thème*, EDF- SFP, juin 1998.
- [Billy et al., 2003] F.Billy, M. Grosgeorge, T.H. Chau, P.Beal, P.Haïk, *Projet "durabilité REP"- Dossier local pressuriseur- Note de Cadrage*, EDF, juillet 2003.
- [Bordes,2000] P. Bordes, *Doctrine de maintenance : Pressuriseur 900 MWe*, EDF, 2000.
- [Grosgeorge, 2001] M. Grosgeorge, *Rapport durée de vie pressuriseur et ligne d'expansion - objectif 60 ans*, EDF, juin 2001.
- [Grosgeorge et Bordes, 2002] M. Grosgeorge et P. Bordes, *Fiche d'analyse de vieillissement*, EDF, juin 2002.
- [Pot, 2002] J. Pot, *Comptabilisation des Situations REP 900 MWe : Analyse de la consommation des situations*, ref. 02/0546, 2002.
- [Couvant et Boursier, 2001] T. Couvant et J.M. Boursier, *Sensibilité à l'amorçage de la corrosion sous contraintes en milieu primaire nominal à 360°C dans l'acier inoxydable austénitique écroui AISI 304L*, EDF, ref. HT-44/01/011/A, 2001.
- [Quere et Michel, 1987] M. Quere, M. Michel, *Rapport de constat sur le pressuriseur, Projet durée de vie*, EDF, juin 1987.
  - Description du matériel, Historique de Conception et de Fabrication, Surveillance en exploitation, Maintenance opérationnelle, Collecte et conservation de données, Propositions d'actions complémentaires.
- [Stutzmann, 1997] A. Stutzmann, *Spécifications chimiques centrales REP*, EDF, ref. D.5001/NRN/R84 442-Ind. 2, avril, 1997.
  - REX étranger :
    - Le GALL NRC, USA : Pressuriseur et Ligne d'expansion
    - R. Boudot, *Projet durabilité, analyse du GALL NRC*, EDF, juin 2001
    - Dossier « License Renewal Application » (LRA) de Turkey-Point 3-4 : Pressuriseur et Ligne d'expansion
    - F.Billy, R.Daou, C.Degrave, A.Lannoy, J-P. Miclot, *Veille technologique sur la durée de vie des centrales PWR âgées, Analyse du dossier « License Renewal Application » (LRA) de Turkey-Point 3-4*, EDF, mars 2002.
    - Dossier License Renewal – Oconee Nuclear Station.

## 3- Informations Collectées pour le pressuriseur et sa ligne d'expansion

### 3.1 Les données de conception

#### 3.1.1 Les différents types de pressuriseurs : il existe deux types de pressuriseur, le PR 40 et le PR 60

- PR 40 : Paliers FESSENHEIM, BUGEY (description et schémas techniques voir [Quere et Michel, 1987] pp-6-25)
- et CPY (description et schémas techniques voir [Quere et Michel, 1987] pp-26-50)
- PR 60 : Paliers PQY (P4 et P'4) et N4 (description et schémas techniques voir [Quere et Michel, 1987] pp-51-75)

On s'intéresse dans ce dossier aux pressuriseurs RP 40 des centrales 900 MWe

#### 3.1.2 Schémas techniques du pressuriseur et des différents tracés de la ligne d'expansion LEP (voir annexe 1)

#### 3.1.3 Liste et affectation des pressuriseurs 900 MWe (voir annexe 2)

#### 3.1.4 Les données géométriques du pressuriseur à froid [Quere et Michel, 1987]

<b>Volume intérieur total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>39,865</b>
<b>Volume d'eau contenu jusqu'à la prise de niveau bas (m<sup>3</sup>)</b>	<b>2,597</b>
<b>Volume d'eau contenu jusqu'à la prise de niveau haut (m<sup>3</sup>)</b>	<b>37,196</b>
<b>Volume de la partie cylindrique entre prise de niveau bas et prise de niveau haut (m<sup>3</sup>)</b>	<b>34,599</b>
<b>Section de la partie cylindrique (aire du miroir d'eau) (m<sup>2</sup>) au-dessus des cannes chauffantes</b>	<b>3,543</b>

#### 3.1.5 Composants du pressuriseur et de la LEP

- 1- Réservoir cylindrique vertical calorifugé composé de trois viroles (sauf pour FESSENHEIM 1 qui en a 4).
- 2- Fond et dôme hémisphériques emboutis.
- 3- Jupe support soudée sur le fond.
- 4- Revêtement multicouches d'acier inoxydable à l'intérieur de l'enceinte du pressuriseur
- 5- Plusieurs piquages :
  - 1 pour la tuyauterie d'aspersion.
  - 3 pour les soupapes SEBIM.
  - 1 pour la ligne l'impulsion des armoires de pilotage des soupapes.
  - 1 pour le trou d'homme.
  - 1 pour la tuyauterie d'expansion.
  - 2 pour les mesures de températures.
  - 1 pour l'échantillonnage.

- 6 pour les mesures de niveau et pression.
  - 6- 60 cannes chauffantes électriques soudées verticalement au fond inférieur ; 24 kW ; recouvertes d'acier inoxydable dans la partie noyée (il y a 78 pénétrations pour le passage des cannes chauffantes sur le fond)
  - 7- 2 grilles horizontales pour le maintien des cannes.
  - 8- 1 tubulure d'aspersion terminée par une pomme d'arrosage (buse d'aspersion).
  - 9- 1 tubulure d'expansion.
  - 10- Butées anti-sismiques : 3 pour CP0 et 4 à partir de CPY
  - 11- 4 supports soudés sur le CPY pour le tore d'échappement des soupapes de sûreté (pour CP0, le supportage est assuré par des colliers rajoutés)
  - 12- Embouts de sécurité en acier inox sur les 6 tubulures permettant de réaliser des soudures homogènes avec les tuyauteries auxiliaires ou la LEP.
  - 13- Manchettes thermiques en acier inox soudées sur l'embout de sécurité des tubulures d'aspersion et d'expansion, pour protéger ces tubulures des chocs thermiques.
  - 14- Bride Y sur les pressuriseurs FESSENHEIM permettant le raccordement entre le fond, la virole du bas et la jupe support.
- LEP 1**-Tuyauteries
- LEP 2**- 1<sup>er</sup> coude sous le pressu
- LEP 3**- Soudures entre tuyauteries
- LEP 4**- Piquage branche chaude

### **3.1.6 Données de conception (voir [Quere et Michel, 1987] pp-76-117 et [Bordes,2000] p. 17 )**

#### ***Les principales évolutions***

- Changement de la conception de l'accrochage manchette thermique sur embout afin d'éliminer la zone singulière : manchette semi-intégrale. Cette conception a été mise en œuvre à partir du pressuriseur Gravelines 2 (CP5) pour la manchette d'aspersion et à partir du pressuriseur Dampierre 2 (CP6) pour la manchette d'expansion.
- Amélioration de la jupe cylindrique : à partir de CPY, 24 ouvertures ont été pratiquées sur la jupe afin d'améliorer la ventilation des connecteurs de cannes chauffantes par convection naturelle ou forcée et agrandissement des ouvertures sur tous les pressuriseurs à partir de Tricastin 2 (CP4).

### **3.1.7 Données de fabrication : élaboration, traitement thermique, assemblage, soudages et revêtements, détensionnement, contrôles non destructifs, anomalies et évolutions (voir [Quere et Michel, 1987] pp-118-172 et [Bordes,2000] pp-13-16, p.18 )**

#### **Traitement thermique de détensionnement [Bordes,2000]**

Le traitement thermique de détensionnement (TTD) global du pressuriseur se décompose en 5 TTD. Chacun est réalisé à 595°C pendant 135 ou 165 minutes. Les 5 sous-ensembles subissant un TTD sont :

- Sous-ensemble 1 : Fond équipé soudé avec la jupe
- Sous-ensemble 2 : Sous-ensemble 1 + virole inférieure
- Sous-ensemble 3 : Dôme équipé avec tubulures

- Sous-ensemble 4 : Sous-ensemble 3 + les 2 viroles supérieures
- Sous-ensemble 5 : Joint final (traitement local)

### 3.1.8 Les coûts de remplacement

Les coups de Dépose/remplacement sont évalués à (voir [Billy et al., 2002]):

Zone	Indisponibilité	Coûts	Dosimétrie
LEP- LBM	30 j + délai de réquisition 2 à 6 mois	3,5 M.Euro de dvpt + 150 K.Euro/ans (pérennité)	213 mSv
LEP- Piquage branche chaude	20 j	1000 K.Euro	50 mSv
LEP- Soudure basse du coude sous le pressuriseur	3 semaines + éventuelle épreuve hydraulique	610 K.Euro de dvpt	127 mSv (CP0) et 71 mSv (CPY)
Piquage d'instrumentation	10 j + DR 1 mois	Dev qualif 1800 K.Euro	50 mSv
Cannes chauffantes	9 j + 3 semaines de chantier	580 K.Euro	50 mSv

Les coûts de remplacement du pressuriseur seul sont estimés à 21 000 kE et pour l'ensemble pressuriseur + LEP 25 000 kE

## 3.2 Les données matériaux relatives aux matériaux

### 3.2.1 Les matériaux

- L'acier faiblement allié **16 MN D 5** constitue l'enveloppe sous pression du matériel
- Les aciers inoxydables austénitiques
  - **Z2 CND 17.12**
  - **Z2 CND 18.12 Az**

- Aciers à très basse teneur en **carbone** pour éviter la corrosion inter granulaire.

- Addition contrôlée **d'azote** pour améliorer les propriétés mécaniques.

Pour les revêtements, la première couche est en acier inoxydable austénitique type Z2 CN 24-12, la deuxième couche et les suivantes en contact avec le fluide primaire sont en acier inoxydable austénitique type Z2 CN 20-10 à très bas carbone.

Composant	Repère (voir annexe 4)	Matériau	
Viroles	218	16 MN D 5	SA 533 cl 1
Jupe		A 48AP	SA 516 gr 70 <b>CP0</b>

	220	16 MN D 5	SA 516 ou SA 533 <b>CPY</b>
Bride Y		16 MN D 5	SA 533 cl 1
Tubulures et trou d'homme	210	16 MN D 5	SA 508 cl 3
Fonds	219	16 MN D 5	SA 533 cl 1
Supports latéraux		16 MN D 5	SA 533 cl 1
Bossage des tourillons	214	16 MN D 5	SA 508 cl 3
Chemises des tubulures	414	Z2 CND 17-12	SA 182 F ou 316 L (AISI)
Embouts des tubulures	431	Z2 CND 17-12	SA 182 F ou 316 L (AISI)
	432	Z2 CND 18-12 Az	<b>CP0 et CP1 à CP4</b> Les tranches suivantes
Manchettes des cannes chauffantes	432	Z2 CND 18-12 Az	
Manchettes thermiques	431	Z2 CND 17-12	SA 182 F ou 316 L (AISI)
Tampons trou d'homme	218	16 MN D 5	SA 533 cl 1
Piquages d'instrumentation	431	Z2 CND 17-12	SA 182 F ou 316 L (AISI)
	432	Z2 CND 18-12 Az	<b>CP0 et CP1 à CP4</b> Les tranches suivantes
Butées parasismiques	218	16 MN D 5	SA 533 cl 1
Goussets et crepines	414	Z2 CND 17-12	SA 182 F ou 316 L (AISI)
Manchettes thermiques 14 "	414	Z2 CND 17-12	SA 182 F ou 316 L (AISI)
Goujons	233	42 CDV 4	A 193 B16 <b>CPY</b>
	232	42 CD 4	A 193 B7 <b>CP0</b>
Erou	46	XC42	A 194 2H
Revêtement intérieur 1 <sup>er</sup> couche		Z2 CN 24-12	
Revêtement intérieur 2 <sup>ème</sup> couche		Z2 CN 20-10	

### 3.2.2 Recensement des différentes zones en inox ( aciers inoxydables austénitiques ) du pressuriseur

- Revêtement intérieur des viroles
- Tuyauterie d'aspersion
- Revêtement de la tubulure d'aspersion
- Embout de la tubulure d'aspersion
- Manchette thermique de la tubulure d'aspersion
- Support buse d'aspersion
- Tuyauterie d'expansion
- Revêtement de la tubulure d'expansion
- Embout de la tubulure d'expansion
- Manchette thermique de la tubulure d'expansion
- Manchettes des cannes chauffantes
- Enveloppe étanche des cannes chauffantes
- Plaques support des cannes chauffantes et goussets de maintien

- Piquages d'instrumentation
- Clavettes ou vis
- Pièce intercalaire pour le joint de trou d'homme

### 3.2.3 Les caractéristiques mécaniques et chimiques des matériaux (voir Annexe 3)

### 3.2.4 Les soudures et les caractéristiques des principales opérations de soudage et de revêtement (voir annexe 4)

<b>Les soudures</b>
Soudure dôme/trou d'homme
Soudure dôme/tubulure d'aspersion
Soudure dôme/tubulures décharge et soupapes
Soudure circulaire dôme/virole
Soudure circulaire fond/virole
Soudure fond/tubulure d'expansion
Soudure bride Y/virole (FESSENHEIM)
Soudure bride Y/jupe (FESSENHEIM)
Soudure bride Y/fond (FESSENHEIM)
Soudures des cannes chauffantes : cannes/brides ; brides ou bouchons/manchettes ; manchettes /fond
Soudure embout de sécurité/tubulure d'expansion ( <b>LBM</b> )
Soudure manchettes thermiques d'expansion
Soudure embout de sécurité/tubulures décharge et soupapes ( <b>LBM</b> )
Soudure embout de sécurité/tubulure d'aspersion ( <b>LBM</b> )
Soudure manchettes thermiques d'aspersion
Soudure jupe/fond (BUGEY et CPY)
Soudure piquages d'instrumentation
Soudure support du tore d'échappement /première virole (CPY)
Soudures longitudinales viroles
Soudures virole/virole
Soudure des supports anti-sismiques

### 3.2.5 Classification de la qualité de fabrication des soudures des pressuriseurs en exploitation (REX) (voir Annexe 5)

## 3.3 Les données fonctionnelles

### 3.3.1 Fonctions Globales [Amblard et Prat, 1998]

- 4- Eviter la vaporisation dans le cœur :
  - par contrôle de la pression du circuit primaire (CP) : le pressuriseur maintient la pression à 155 bars,
  - en protégeant le CP contre les dépressurisations.
- 5- Protéger le CP contre les surpressions
- 6- Reprendre les variations de volume du fluide primaire.

Le contrôle de la pression se fait par :

- **Chauffage** , assuré par des cannes chauffantes,
- **Refroidissement** assuré par aspersion d'eau issue de la branche froide.

**La ligne d'expansion (LEP)** assure la liaison permanente entre le pressuriseur et le CPP.

### 3.3.2 Découpage matériel (voir Annexe 6)

### 3.4 Les paramètres de fonctionnement [Amblard et Prat, 1998]

- Pression nominale : 155 bars ;
- Température nominale : 345 °c ;
- Environnement chimique :
- Volume d'eau à Pn : 24 m<sup>3</sup> ;
- Volume vapeur à Pn : 16 m<sup>3</sup> ;

### 3.5 Les données d'environnement

#### 3.5.1 Situation et emplacement dans la tranche

Le pressuriseur est situé sur une branche chaude du circuit primaire principal (CPP).

#### 3.5.2 Les matériels environnants

- 1- Ligne d'expansion (LEP) : incluse dans l'étude.
- 2- Tuyauterie d'aspersion : deux lignes piquées sur deux pompes primaires : eau à 286 °c pour l'aspersion normale, eau à 245 °c pour l'aspersion auxiliaire
- 3- Les soupapes SEBIM
- 4- Le réservoir de décharge du pressuriseur (RDP)

**3.5.3 Milieu chimique :** milieu primaire, équilibre eau / vapeur à 345 °c,

- Pour les spécifications chimiques du milieu primaire et le hors spécifications (**voir annexe 7**)

### 3.6 Les données d'exploitation

#### 3.6.1 Les différents régimes d'exploitation du matériel : Les transitoires d'exploitation (voir Fascicule N° 325 Pressuriseur)

- **Les transitoire normaux**

Ce sont ceux qui n'occasionnent pas l'arrêt d'urgence :

- **Démarrage : formation de la bulle**

Au départ le pressuriseur est rempli entièrement d'eau boriquée

Procédure de démarrage pour les paliers 900 MWe :

Pression primaire : **30 bar** (pression minimale pour le fonctionnement des pompes primaires)

Températures caloporteur : **120°C**

Mise en service des résistances chauffantes

Quand T=234°C (T=Ts pour **30 bar**), mise en service de la régulation de niveau du pressuriseur

On maintient la pression par chauffage : formation de la bulle.

- **Arrêt : Suppression de la bulle**

Au départ on a une régulation normale de pression et de niveau en service, une puissance nulle et au moins une pompe primaire en service.

Procédure d'arrêt :

Les cannes chauffantes sont mise hors service

L'eau du pressuriseur est alors refroidie par l'aspersion

Quand  $P = 30 \text{ bar}$  on maintient cette pression par chauffage (à cause du fonctionnement des pompes primaires) et on met en service le RRA

Arrêt des pompes primaires et mise hors service des résistances de chauffage

Démarrage de l'aspersion auxiliaire

Le caloporteur continue à être refroidi par le RRA (jusque  $70^\circ\text{C}$  environ) et la pression est contrôlée par la soupape de liaison RRA-RCV

Noyage du pressuriseur

- **gradient de température primaire**

Généralement le gradient de température admissible pour les équipements du circuit primaire est de  $55^\circ\text{C/h}$ . Mais il s'agit d'une valeur maximale.

En effet, les cannes chauffantes ne permettent pas en général au cours de la montée de température de dépasser un gradient de  $30^\circ\text{C/h}$  environ.

- **gradient de pression primaire**

Le gradient de pression n'est généralement pas explicité, sauf pour Tihange : 47 bar/h.

- **gradient de charge**

Le gradient de 5% minute est souvent retenu, ce qui correspond à un temps de montée en charge de 20 mn pour une différence de température moyenne de  $30^\circ\text{C}$  environ entre charge nulle et pleine charge.

- **Steps instantanés de charge**

Soit  $P_1$  la puissance demandée à l'alternateur et  $P_2$  la puissance fournie par le réacteur. Suite à un step de charge de  $-10\%$ , on a  $P_1 < P_2$ . Dans ce cas on limite la montée en pression, puis on diminue celle-ci par : aspersion, condensation, décharge RCV, réduction du volume caloporteur.

Dans le cas où on a un step de  $+10\%$ ,  $P_1 > P_2$ . On limite la baisse de pression puis on remonte celle-ci par : chauffage, vaporisation, charge RCV, augmentation du volume caloporteur.

- **Hotage : passage de la pleine charge à la puissance des auxiliaires**

Les phénomènes sont comparables aux phénomènes qui accompagnent un step négatif de  $-10\%$ . L'augmentation de pression peut être plus importante et atteindre même le seuil d'ouverture des vannes de décharge.

Quand ce transitoire est passé, les vannes de décharge se referment.

- **Les transitoire anormaux**

- **Perte de réfrigérant primaire**

Le pressuriseur peut se vider rapidement. Il subit donc un gradient de pression très important pouvant atteindre 160 bar en quelques secondes. Simultanément la pression augmente dans l'enceinte. Il faut que les équipements résistent à cette surpression.

- **Perte d'une ou deux pompes primaires**

Cette perte est importante dans la mesure où elle affecte des pompes associées à l'aspersion

- **Défaillances du circuit RCV**

Défaillance du dédit de charge : le niveau du pressuriseur baisse et peut atteindre le niveau d'arrêt d'urgence.

Défaillance du dédit de décharge : suivant l'incident le niveau du pressuriseur croît ou décroît.

- **Augmentation brutale de la charge : plus de 10%**

Le niveau du pressuriseur baisse et atteint le niveau d'arrêt d'urgence.

- **Diminution brutale de la charge**

- **Ilotage (sans contournement de la turbine par la vapeur)**

L'augmentation de la pression est très importante et atteint la pression de tarage des soupapes de sûreté.

Il y a arrêt d'urgence par surpression.

**L'aspersion continue** : le pressuriseur fonctionne, depuis quelques années, suivant le principe de l'aspersion continue afin :

- d'éviter les chocs thermiques sur les tuyauteries d'aspersion en assurant un débit continu,
- d'assurer l'homogénéité chimique de fluide contenu dans les pressuriseur, relativement au fluide du circuit primaire principal,
- de limiter les phénomènes de stratification entre le bas et le haut du pressuriseur.

### 3.6.2 La comptabilisation des situations (Voir [Pot, 2002] et voir Annexe 8)

## 3.7 Les données de maintenance

### 3.7.1 Les données de maintenance

- Doctrine de maintenance (voir [Bordes,2000])
- Surveillance en exploitation (voir [Quere et Michel, 1987] pp-173-180, **voir annexe 9**)
- Maintenance opérationnelle (voir [Quere et Michel, 1987] pp-180-182)
- Remplacement du pressuriseur (voir note d'étude ref. E-M-E-CM/00-0206 )

### 3.7.2 Obsolescence : Pas d'obsolescence

### 3.7.3 Différents coûts de maintenance

**Pressuriseur :**

Zone ou soudure	Type de contrôle	Coûts
Soudure des piquages	Visuel	<b>0,8 k€, Tricastin 1, 1999</b>
Manchettes de cannes chauffantes	Surveillance acoustique de fuite pendant épreuve hydraulique du CCP	<b>45 k€</b>
Manchettes thermiques d'aspersion	Gammagraphie double paroi	de <b>7,2 k k€, Graveline 1, 1997</b> à <b>12 k k€, Tricastin 4, 2000</b>

Le coût total des examens non destructifs au titre de la maintenance préventive du pressuriseur lors d'une visite complète est estimé à 900 k€ (Tricastin, 1999)

**Ligne d'expansion LEP :**

Zone ou soudure	Type de contrôle	Coûts
Soudure basse du coude à 90°	Gammagraphie	-
Autres soudures du coude	Visuel	<b>38 k€, Graveline, 2001</b>
Manchettes thermiques d'expansion	Ultrasons	de <b>1,6 k€, Bugey 5, 1997</b> à <b>223 k€</b> lorsque APSIS est utilisé, Dampierre 1, 1997
Bec de piquage de la LEP	Pas de contrôles	-

**3.7.4 La réglementation****Voir l'Arrêté d'Exploitation du 11/10/99.**

Cet arrêté impose à l'exploitant un certain nombre de dispositions nouvelles, notamment en terme de suivi en service (article 4 II), de suivi de l'évolution des propriétés des matériaux (article 12), ou de traitements des défauts découverts (article 13).

Toute augmentation de la durée de vie des tranches nécessitera une mise à jour des dossiers de référence (prévue à l'article 5).

**3.8 Les données de retour d'expérience****8.1 Retour d'expérience EDF: REX SAPHIR (voir Annexe 10)****8.2 Retour d'expérience étranger (voir annexe 11)****8.3 Retour d'expérience analogue (voir annexe 12)**

- Corrosion sous contraintes des aciers inoxydables austénitiques voir [Couvant et Boursier, 2001]

### 3.9 Les données de fiabilité

- Etude EDF [Billy et al., 2002], [Billy et al., 2003] : Problèmes potentiels concernant le pressuriseur à l'horizon de 60 ans (voir annexe 13)
- AMDE suivant GALL (voir annexe 14)

#### 3.9.1 Les facteurs d'usage (voir Annexe 15)

#### 3.9.2 Dommages mécaniques potentiels selon des études de fiabilité à EDF

- Fissuration par fatigue

- Rupture brutale

- *Indicateurs*

**Rupture fragile** : corrélée à la teneur en phosphore

- *Zones considérées*

- Coin tubulure d'expansion
- Coin tubulure d'aspersion
- Virole soumise aux aspersion

**Rupture ductile (résistance à la déchirure)** : corrélée à la teneur en soufre

- *Zones considérées*

- Coin tubulure d'expansion
- Liaison bimétallique de la tubulure d'expansion
- Coin tubulure d'aspersion
- Liaison bimétallique de la tubulure d'aspersion
- Virole soumise aux aspersion

- Déformation excessive

- Déformation progressive

- Instabilités élastique, plastique et élastoplastique

#### **REX**

- Dégradations aux niveaux de la soudure jupe-fond et de la soudure jupe-semelle, dégradations résultant du processus de fabrication.

- Une indication de fissuration à froid mise en évidence en paroi externe de la LBM de l'expansion du pressuriseur de BUGÉY 5 en 1998.

- Important débit de dose au droit de la LBM de la ligne d'expansion : sur certains pressuriseurs, des dépôts actifs sont piégés en particulier dans l'interstice manchette thermique/tubulure d'expansion et conduisent à un débit de dose élevé qui interdit la réalisation des contrôles réglementaires de gammagraphie en fond du pressuriseur.

### 3.9.3 Mécanismes de dégradation avérés ou potentiels selon des études de fiabilité à EDF

#### - Fatigue thermique

##### *Indicateurs*

- Facteur d'usage en zones courantes et facteur d'amorçage ou de fissuration progressive en zones singulières.
- Prise en compte des fluctuations thermiques en zones de mélange.

##### *Les zones singulières*

- Piquages d'instrumentation.
- Liaison manchette de cannes chauffantes – fond.
- Manchette thermique de la tubulure d'expansion.
- Manchette thermique de la tubulure d'aspersion.

*Zones particulièrement chargés mécaniquement* (pour lesquels l'extension de la durée de vie au-delà de 40 ans nécessite un examen particulier)

- **Tubulure d'expansion : soudure de l'embout de sécurité sur la tuyauterie**
- **Tubulure d'aspersion : soudure de l'embout de sécurité sur la tuyauterie (N4), soudure embout-manchette (900 MWe), ou zone singulière de la manchette thermique (CPO, début CPY)**
- Liaison jupe-fond (900 MWe)
- Liaison dôme-virole : zones soumises aux aspersion (N4)
- **Manchette de cannes chauffantes**
- Viroles près des supports de soupapes ou des supports latéraux (N4)
- Piquages d'instrumentation (1300 MWe) et zone singulière de piquage
- **Aval premier coude de la ligne d'expansion sous le pressuriseur (900 MWe)**
- **Piquage de la ligne d'expansion en branche chaude (renforcement du piquage, soudure sur la tuyauterie primaire)**

#### - Vieillessement thermique

Le vieillissement thermique est un décalage de la température de transition fragile-ductile vers des valeurs plus élevées.

L'acier faiblement allié (16 MND5/ 18 MND5) qui constitue l'enveloppe sous pression du matériel voit ses propriétés de ténacité diminuer au cours du temps. Ce phénomène résulte d'une modification métallurgique du matériau.

Le vieillissement thermique, fortement dépendant de la température de service, est fonction de la structure métallurgique de l'acier (taille de grains notamment) et de sa teneur initiale en élément résiduels (phosphore notamment)

**- Corrosion****Corrosion des LBM (acier austénitique)*****REX***

- Des défauts de type dé-cohésion inter-granulaire DIG, sont apparus par corrosion atmosphérique. Ces défauts n'évoluent pas de manière significative.

***Maintenance***

- Corrective : réparation par affouillement
- Préventive : diminution de la périodicité des examens de contrôle

**Corrosion des piquages d'instrumentation en alliages base nickel (1300 MWe)*****REX***

- Près du tiers des piquages était fissuré, après des durées de fonctionnement comprises entre 8000 et 30000 heures, par corrosion sous contrainte de l'alliage 600 (Ni-Fe-Cr) à la température du pressuriseur (345°C).

***Maintenance***

- Corrective : tous les piquages 1300 MWe ont été remplacés et l'acier inoxydable austénitique a été réintroduit.

**Corrosion sous contraintes des cannes chauffantes (N4)*****REX***

- Détérioration d'une canne chauffante sur CHOOZ B2 en 1997.
- Corrosion sous contraintes de l'inox écroui en milieu primaire nominal, accélérée par une surchauffe locale de paroi au passage de la plaque guide.
- Le procédé de fabrication mis en œuvre pour les cannes N4 (martelage en une seule passe) est susceptible d'induire un niveau de contrainte résiduelles plus élevées que pour les fabrications antérieures.
- Le caractère « générique » de ce phénomène est à étudier.

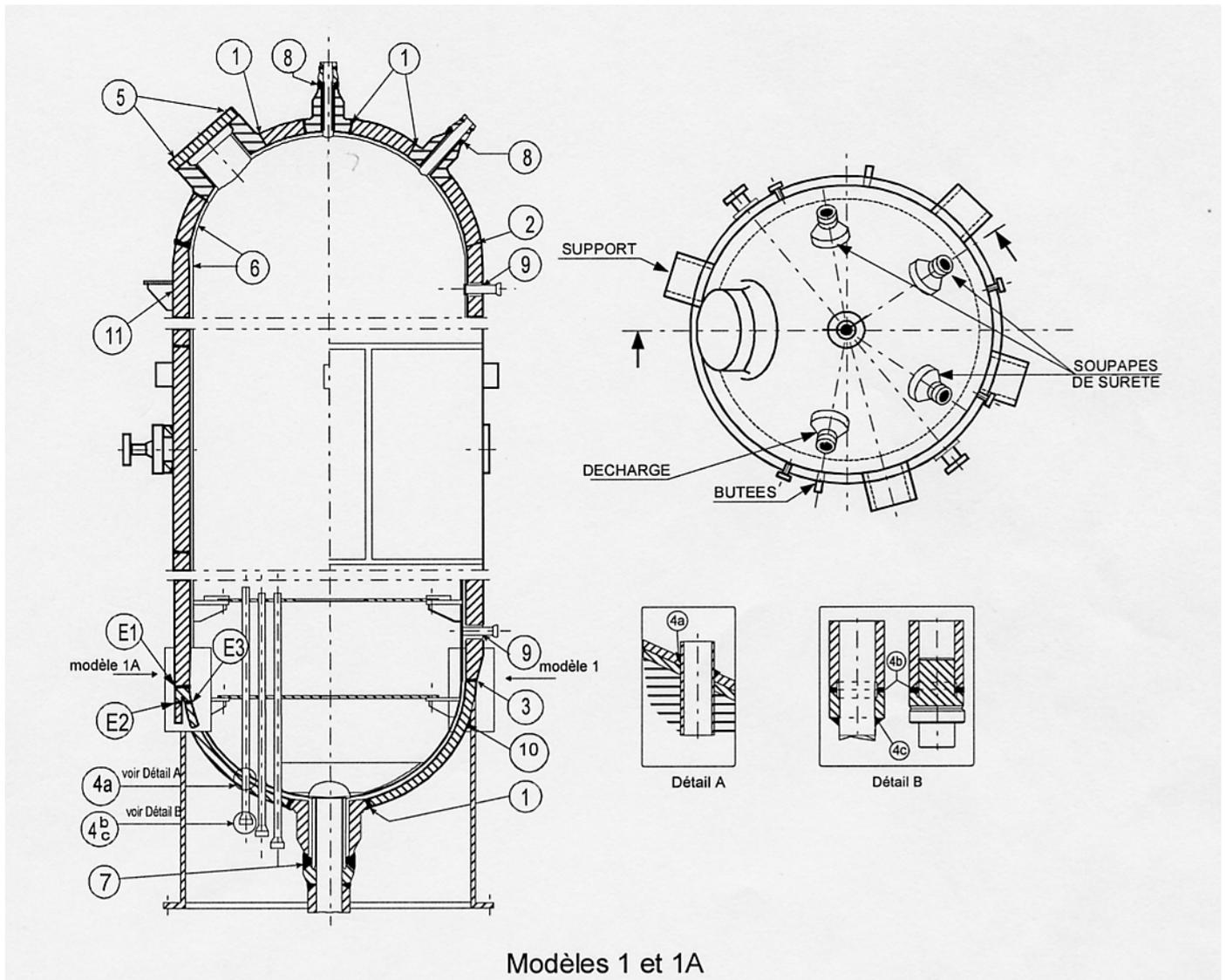
***Maintenance***

- Préventive : le détensionnement thermique des futures gaines (aux alentours de 900°-1000°C) est envisagé.

Annexes 4.1 à 4.15 du document 2,  
Informations pour l'anticipation



**Annexe 4.1 : Schéma technique du pressuriseur**  
[Bordes,2000]



Les différences existantes dans la zone de jonction entre le fond, la virole inférieure et la jupe de supportage sont précisées sur le schéma :

- **Modèle 1A : pressuriseur de FESSENHEIM (avec bride Y)**
- **Modèle 1 : autres pressuriseurs du palier 900 MWe**

<b>1</b>	Soudure dôme/trou d'homme	<b>6</b>	Revêtement interne
	Soudure dôme/tubulure d'aspersion	<b>7</b>	Soudure embout de sécurité/tubulure d'expansion ( <b>LBM</b> )
	Soudure dôme/tubulures décharge et soupapes	<b>8</b>	Soudure embout de sécurité/tubulures décharge et soupapes ( <b>LBM</b> )
<b>2</b>	Soudure circulaire dôme/virole	<b>8</b>	Soudure embout de sécurité/tubulure d'aspersion ( <b>LBM</b> )
<b>3</b>	Soudure circulaire fond/virole	<b>9</b>	Soudure piquages d'instrumentation
<b>1</b>	Soudure fond/tubulure d'expansion	<b>10</b>	Soudure jupe/fond (BUGEY et CPY)
<b>4</b> <b>a</b> <b>b</b> <b>c</b>	Soudures des cannes chauffantes : manchettes /fond	<b>11</b>	Soudure support du tore d'échappement /première virole (CPY)
	canes/brides		
	brides ou bouchons/manchettes		
<b>5</b>	Goujons	<b>E1</b>	Soudure bride Y/virole (FESSENHEIM)
	Ecrous	<b>E2</b>	Soudure bride Y/jupe (FESSENHEIM)
	Ligaments	<b>E3</b>	Soudure bride Y/fond (FESSENHEIM)
	Taraudages		

## Schémas des différents tracés de la ligne d'expansion LEP

[Quere et Michel, 1987]

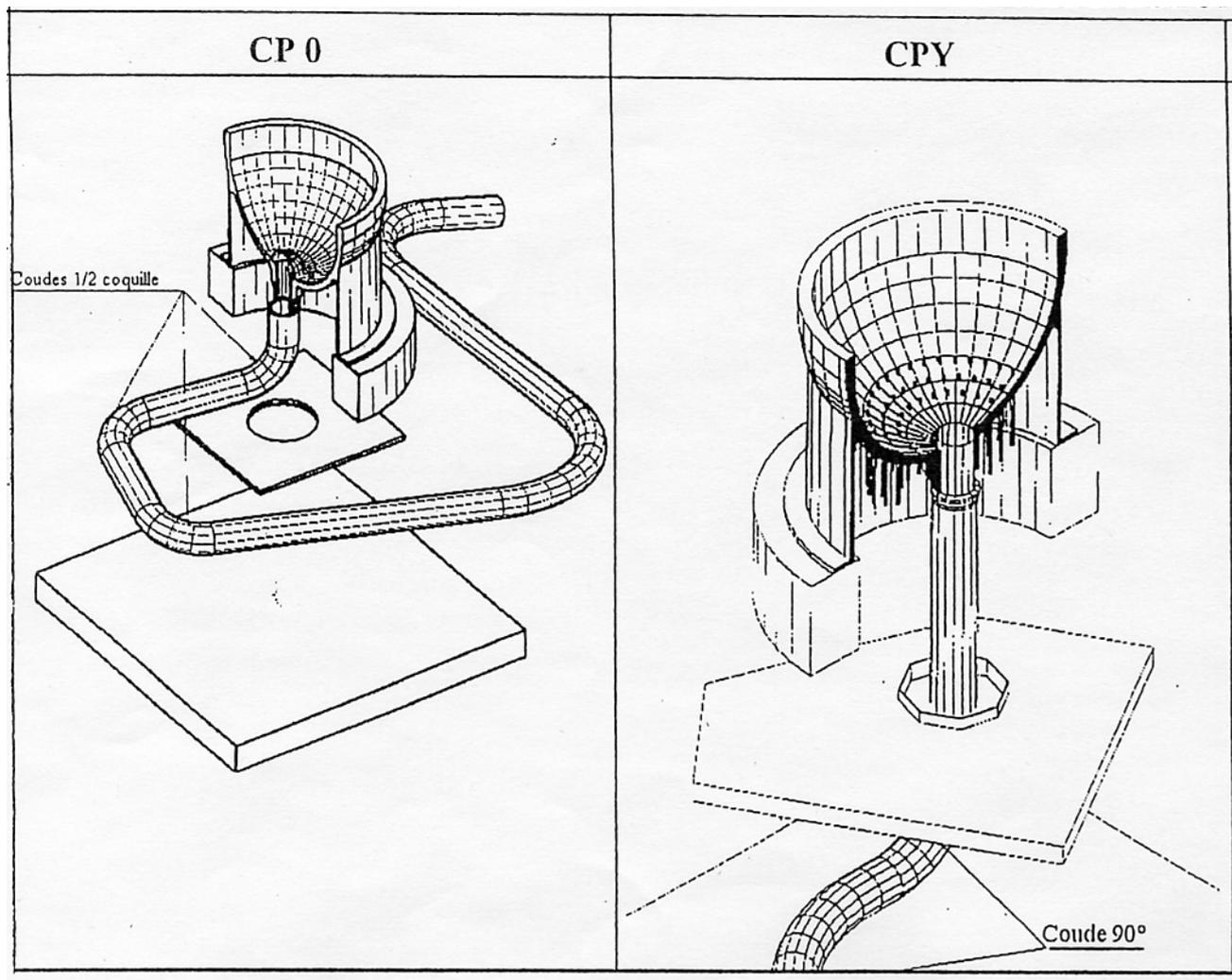


Schéma de la manchette thermique d'aspersion du pressuriseur  
Soudure circulaire - Tranches FESSENHEIM et BUGEY  
[Quere et Michel, 1987]

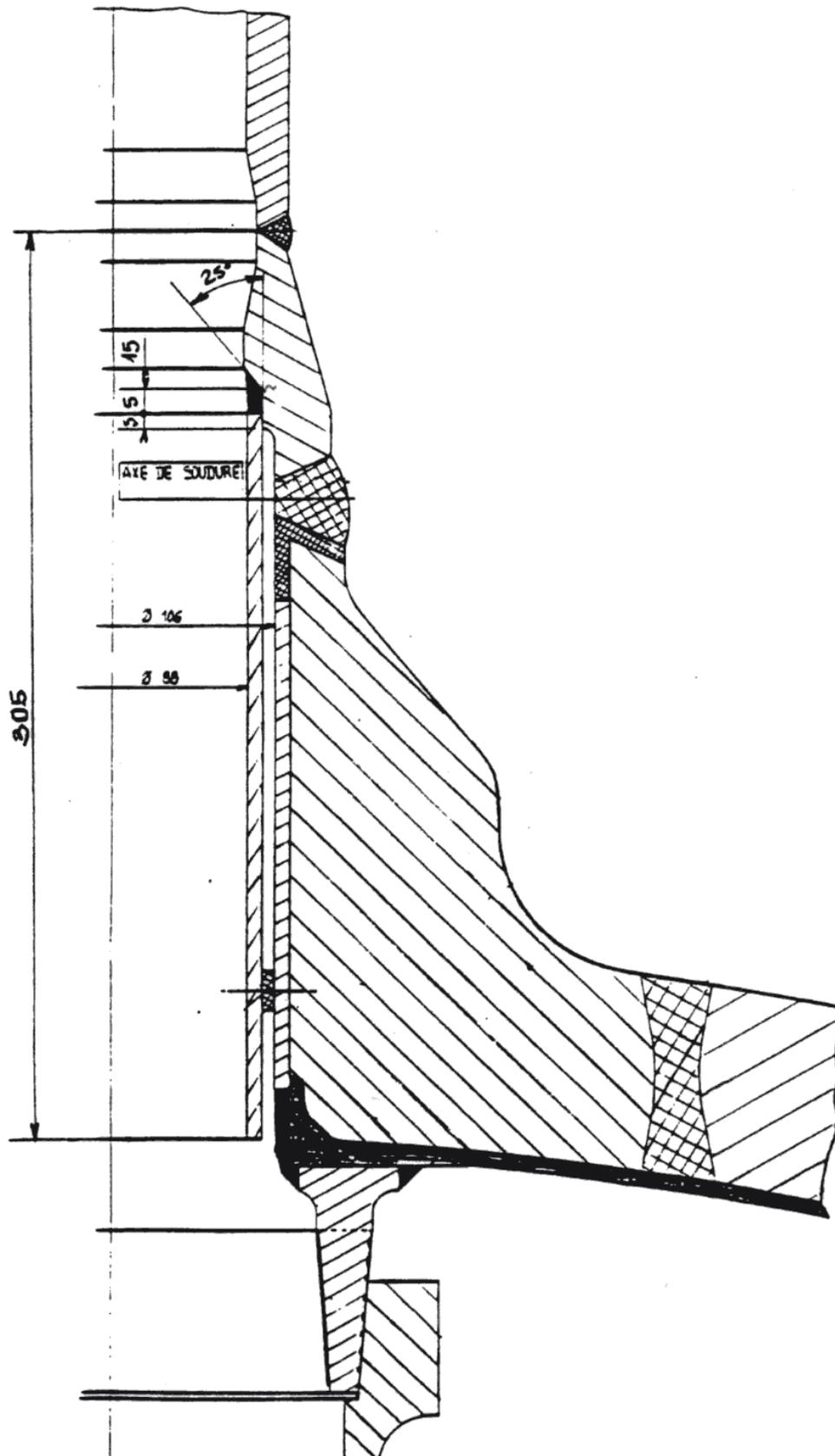


Schéma de la manchette thermique d'aspersion du pressuriseur  
Soudure circulaire - Tranches CP1 à CP4  
[Quere et Michel, 1987]

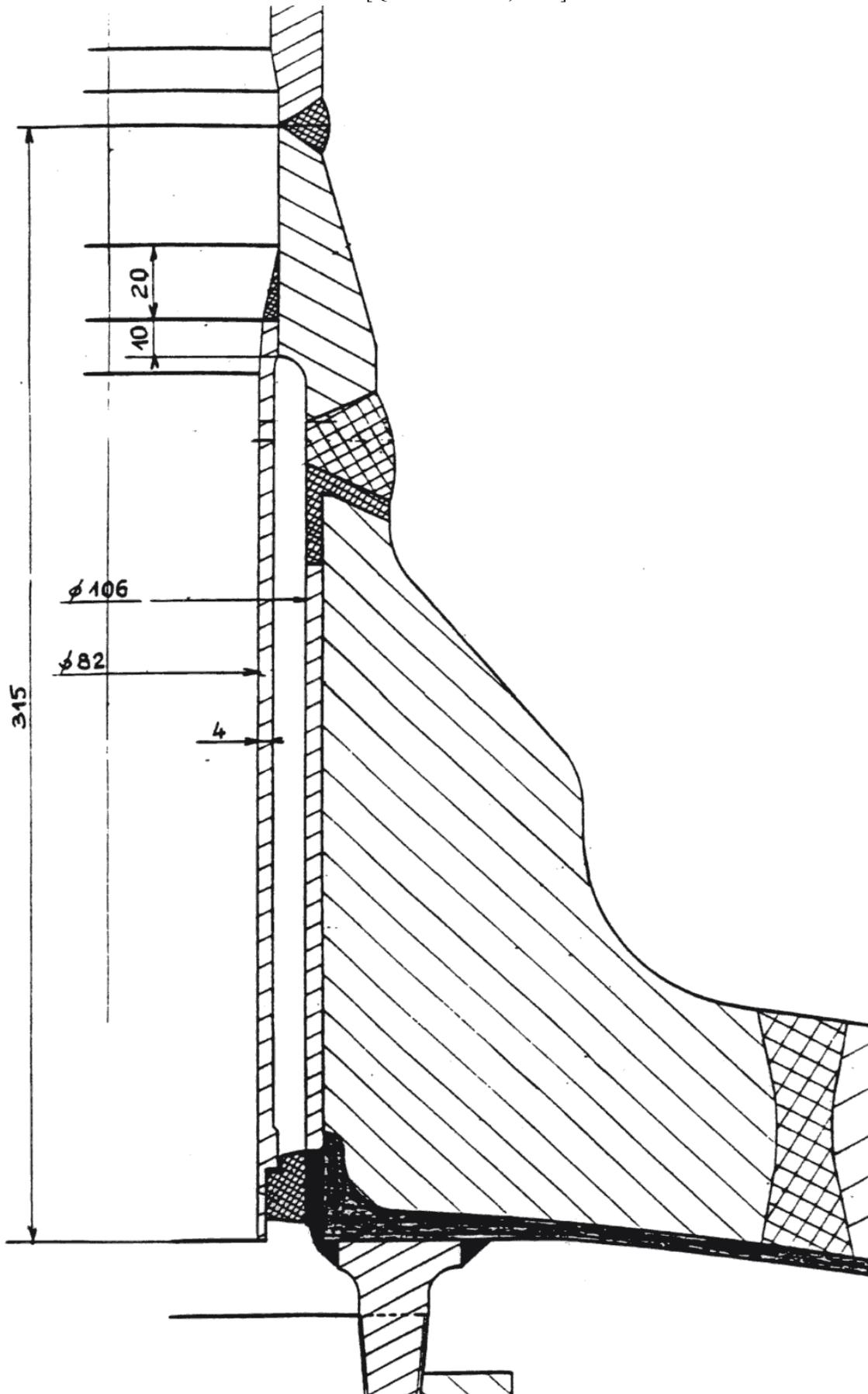


Schéma de la manchette thermique d'aspersion du pressuriseur  
Manchette semi-intégrale - Tranches CP5 à CP28  
[Quere et Michel, 1987]

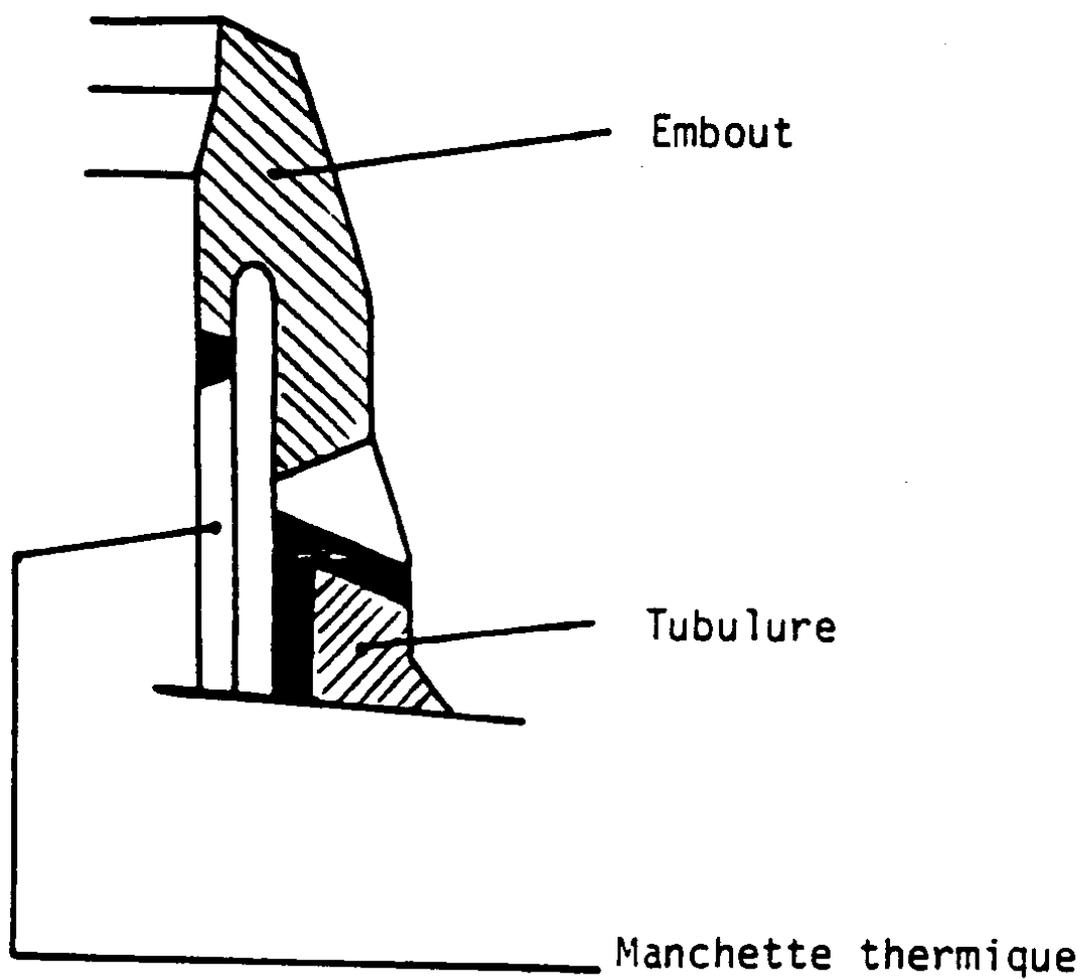
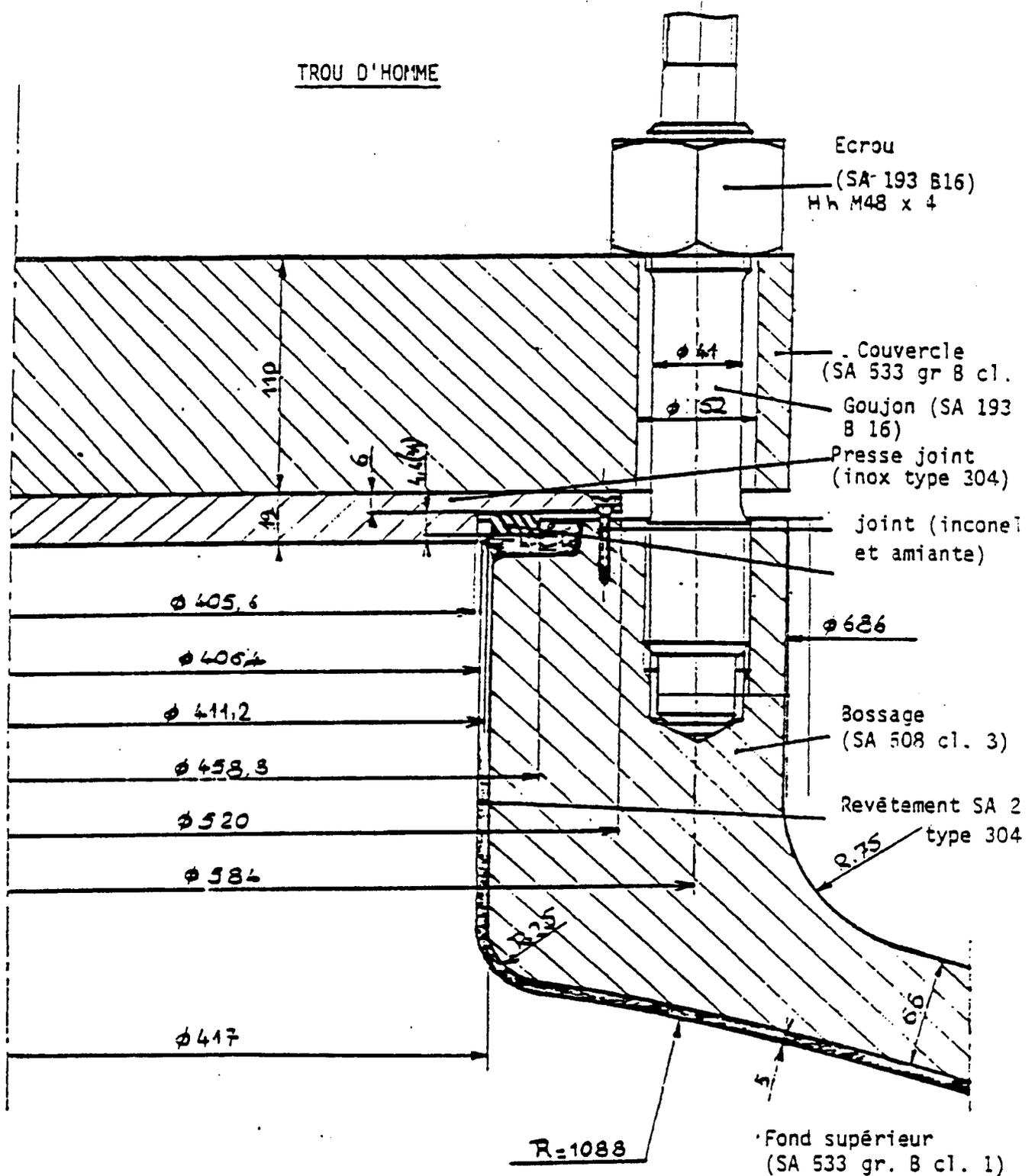


Schéma du trou d'homme  
[Quere et Michel, 1987]



(\*) avant écrasement

## Annexe 4.2 : Liste et affectation des pressuriseurs 900 MWe

[Bordes,2000]

palier	tranche	n° ordre	n° pressuriseur
CP0	BUGEY 2	3	3 *
	BUGEY 3	4	4 *
	BUGEY 4	5	5 *
	BUGEY 5	6	6 *
	FESSENHEIM 1	1	1 *
	FESSENHEIM 2	2	2 *
CPY	BLAYAIS 1	CP12	21
	BLAYAIS 2	CP16	25
	BLAYAIS 3	CP19	18 *
	BLAYAIS 4	CP20	34
	CHINON B1	CP17	27
	CHINON B2	CP18	26
	CHINON B3	CP27	52
	CHINON B4	CP28	53
	CRUAS 1	CP21	35
	CRUAS 2	CP22	36
	CRUAS 3	CP23	37
	CRUAS 4	CP24	16 *
	DAMPIERRE 1	CP3	9 *
	DAMPIERRE 2	CP6	13
	DAMPIERRE 3	CP11	20
	DAMPIERRE 4	CP15	24
	GRAVELINES 1	CP2	8 *
	GRAVELINES 2	CP5	12
	GRAVELINES 3	CP8	19
	GRAVELINES 4	CP13	22
	GRAVELINES 5	CP25	38
	GRAVELINES 6	CP26	39
	SAINT-LAURENT B1	CP9	15
	SAINT-LAURENT B2	CP14	23
	TRICASTIN 1	CP1	7 *
	TRICASTIN 2	CP4	10 *
	TRICASTIN 3	CP7	14
	TRICASTIN 4	CP10	17

\* : Pressuriseurs Creusot-Loire

**NOTA :** Pressuriseur n°11 rebuté.  
Pressuriseurs n°32 et 33 : exportation.

## Annexe 4.3 : Les caractéristiques mécaniques et chimiques des matériaux des pressuriseur 900 MWe

[Tranches nucléaires REP : matériels et matériaux, EDF, Direction de l'équipement, Mai, 1989]

Repère	Désignation AFNOR	Référence (1) code ou norme	Elaboration (2)	Composition chimique spécifiée en % (sur coulée)										Propriétés mécaniques				
				C min /max	Si min /max	Mn min /max	Ni min /max	Cr min /max	Mo min /max	V min /max	S max	P max	Autres max max		Rm N/mm <sup>2</sup> min/max	Re N/mm <sup>2</sup> min	A% min	KC min U ou V daJ/cm <sup>2</sup> / T°C
210	16 MN D 5	CM M 2114	F	/0.20	0.10 /0.30	1.15 /1.55	0.50 /0.80	/0.25	0.45 /0.55	/0.01	0.012	0.015	Al 0.04 Cu 0.20 Co 0.03		550 /670	400	20	V /9.0
214	16 MN D 5	CM M 2118	F	/0.20	0.10 /0.30	1.15 /1.55	0.50 /0.80	/0.25	0.45 /0.55	/0.03	0.012	0.015	Al 0.04 Cu 0.20		550 /670	400	20	V /7.0
218	16 MN D 5	CM M 2123	T	/0.20	0.10 /0.30	1.15 /1.55	0.50 /0.80	/0.25	0.45 /0.55	/0.01	0.012	0.015	Al 0.04 Cu 0.20		550 /670	400	20	V /7.0
219	16 MN D 5	CM M 2124	T	/0.20	0.10 /0.30	1.15 /1.55	0.50 /0.80	/0.25	0.45 /0.55	/0.01	0.012	0.015	Al 0.04 Cu 0.20		550 /670	400	20	V /7.0
220	16 MN D 5	CM M 2125	T	/0.20	0.10 /0.30	1.15 /1.55	0.50 /0.80	/0.25	0.45 /0.55	/0.03	0.012	0.015	Al 0.04 Cu 0.20		550 /670	400	20	V /7.0
232	42 CD 4	CM M 2411	F ou L	0.38 /0.48	0.10 /0.40	0.75 /1.0		0.80 /1.15	0.15 /0.30	0.25 /0.35	0.030	0.030			860 /1060	720	14	V /7.5
233	42 CDV 4	CM M 2411	F ou L	0.36 /0.44	0.20 /0.35	0.45 /0.70		0.80 /1.15	0.50 /0.65		0.030	0.030			865 /1065	725	16	V /7.6
414	Z2 CND 17-12	CM-M3301	F	/0.03	/1.0	/2.0	10.0 /14.0	16.0 /19.0	2.25 /2.75		0.030	0.040	B 15 ppm	Cu 1	490/	175	45	U /16
431	Z2 CND 17-12	CM-M3304	Tu	/0.03	/0.75	/2.0	10.0 /14.0	16.0 /19.0	2.25 /2.75		0.030	0.040		Cu 1	490/	175	45	U /16
432	<u>Z2 CND 18-12 Az</u>	CM-M3304	Tu	/0.035	/1.0	/2.0	11.5 /12.5	17.0 /18.0	2.25 /2.75	N2 /0.08	0.030	0.040		Cu 1	520/	220	45	U /16

(1) Référence Code : les 2 premières lettres signifient : CM = RCCM

(2) Elaboration : F : forge ; L : laminage ; T : tôle ; Tu : tube sans soudure

## Annexe 4.4 : Les caractéristiques des principales opérations de soudage et de revêtement

[Bordes,2000]

	Fessenheim 1	Fessenheim 2	Bugey 2 à 5	CP1 à 4	CP5 à 28
Tubulures : beurrage	électrodes enrobées 309L + 308L	électrodes enrobées 309L + 308L	électrodes enrobées 309L + 308L	électrodes enrobées 309L + 308L	électrodes enrobées 309L + 308L
Tubulures : soudage embout	électrodes enrobées inox 308L	électrodes enrobées inox 308L	électrodes enrobées inox 308L	électrodes enrobées inox 308L	électrodes enrobées inox 308L
Tubulures : soudage manchette thermique	électrode 308L	électrode 308L	électrode 308L	électrode 308L	insert 308L
Revêtement viroles et fonds : procédé produit d'apport	auto feuillard 60 mm et flux	auto feuillard 60 mm et flux	auto feuillard 60 mm et flux	auto feuillard 60 mm et flux	auto feuillard 60 mm et flux
Soudage enceinte sous pression : procédé produits d'apport	Aucune évolution notable depuis Fessenheim, seule la forme des chanfreins a évolué Soudage automatique fil / flux avec recomplètement manuel				
Constitution jupe de supportage	Jupe sans beurrage intérieur	Jupe sans beurrage intérieur	Jupe sans beurrage intérieur	Jupe sans beurrage intérieur	Beurrage depuis CP12
Piquages d'instrumentation	Voir figure 7 en annexe 1				
Soudage crépine	électrodes inox soudage usine	électrodes inox soudage usine	électrodes inox soudage usine	électrodes inox soudage usine	électrodes inox soudage usine
Soudage des cannes chauffantes	électrode inox usine	TIG auto avec insert fusible soudage d'origine sur site	TIG auto avec insert fusible (1)	TIG auto avec insert fusible usine	TIG auto avec insert fusible usine
Soudage des plaques et supports de plaques	électrode inox	électrode inox	électrode inox	électrode inox	électrode inox

(1) : Soudage sur site suite à la détérioration des cannes pendant les EAC (EAC effectués sans présence du calorifuge sur le fond inférieur). Cet incident a conduit à une évolution de conception : l'augmentation des ouvertures pratiquées dans la jupe pour la ventilation des connecteurs des cannes chauffantes.

**Annexe 4.5 : Classification de la qualité de fabrication des soudures des pressuriseurs  
en exploitation (REX) [Bordes,2000]**

Zone ou soudure	Type de contrôle	Longueur de soudure	Nombre de zones concernées	Nombre d'indications > seuil de caractérisation	Densité
Soudure dôme/trou d'homme	Gammagraphie simple paroi	2,7	34	80	0,26
Soudure dôme/tubulure d'aspersion		1,2	34		
Soudure dôme/tubulures décharge et soupapes		4 × 1,3	34		
Soudure circulaire dôme/virole	Gammagraphie simple paroi	7,5	34	37	0,15
Soudure circulaire fond/virole	Ultrasons	7,5	32	12	0,05
Soudure fond/tubulure d'expansion	Gammagraphie simple paroi	2	34	24	0,35
Soudure bride Y/virole (FESSENHEIM)	Ressuage	7,5	2	1	0,066
	Ultrasons	7,5	2	0	0
Soudure bride Y/jupe (FESSENHEIM)	Ressuage	6,9	2	2	0,14
Soudure bride Y/fond (FESSENHEIM)	Ultrasons	8,8	2	1	0,06
Soudures des cannes chauffantes : cannes/brides brides ou bouchons/manchettes manchettes /fond	Détection acoustique		7544	0	0
Goujons	Ultrasons		544	0	0
	Visuel		544	42	0,08
Ecrous	Visuel		544	63	0,12
Ligaments	Ultrasons		544	0	0
Taraudages	Visuel		544	16	0,03
Revêtement interne	Examen télévisuel		34	10	0,29
Soudure embout de sécurité/tubulure d'expansion (LBM)	Gammagraphie double paroi	1	34	4	0,29
	Ressuage	1	34	3	0,11
Soudure manchettes thermiques d'expansion FESSENHEIM, BUGEY, CP1 à CP5 À partir de CP6	Gammagraphie double paroi	1	11	23	2,09
		1	23	3	0,13
Soudure embout de sécurité/tubulures décharge et soupapes (LBM)	Gammagraphie double paroi	4 × 0,4	34	21	0,39
	Ressuage	4 × 0,4	34	20	0,15
Soudure embout de sécurité/tubulure d'aspersion (LBM)	Gammagraphie double paroi	0,3	34	0	0
	Ressuage	0,3	34	6	0,18
Soudure manchettes thermiques d'aspersion FESSENHEIM, BUGEY, CP1 à CP4 À partir de CP5	Gammagraphie double paroi	0,3	10	16	5,33
		0,3	24	1	0,14
Soudure jupe/fond (BUGEY et CPY)	Ultrasons	6,9	32	187	0,85
	Ressuage	6,9	32	2	<0,1
Soudure piquages d'instrumentation	Visuel		306	0	0
Soudure support du tore d'échappement /première virole (CPY)	Ressuage		112	59	0,53
Soudures longitudinales viroles	Ultrasons	-	-	Examen de fin de fabrication	
Soudures virole/virole	Ultrasons	-	-	Examen de fin de fabrication	
Soudure des supports anti-sismiques	-	-	-	-	-

## Annexe 4.6 : Le découpage matériel

[Billy et al., 2003]

GF	Ensemble technologique	Sous-ensemble technologique	Composant	Page du schéma associé dans [Quere et Michel, 1987]	
Pressuriseur	Enveloppe de confinement	Ensemble enveloppe	Virole		
			Fond hémisphérique supérieur		
			Fond hémisphérique inférieur		
			Revêtement inox intérieur		
			Bride en Y (Fessenheim 1 uniquement)	page 16 (détail A)	
		Système d'assemblage de l'enveloppe	Soudures longitudinales des viroles		
			Soudures circulaires des viroles		
			Fixation par soudure du fond inférieur sur virole		
			Fixation par soudure du fond supérieur sur virole		
			Fixation par soudures de la bride en Y sur fond inférieur (Fessenheim 1 uniquement)	page 16 (détail A)	
	Dispositif d'apport d'énergie	Système de cannes chauffantes	Cannes chauffantes		
			Manchons de liaison des cannes chauffantes (sauf Fessenheim 1)	pages 21 et 23	
			Fixation par soudures des cannes chauffantes sur manchons de liaison (sauf Fessenheim 1)	pages 21 et 23	
			Etanchéités des cannes chauffantes	page 22	
		Système de connexion des cannes chauffantes	Manchettes de pénétration des cannes chauffantes	page 61	
			Fixations par soudure des manchettes sur fond inférieur	pages 61 et 115 (type 11)	
			Fixations par soudure des cannes chauffantes sur manchette (Fessenheim 1 uniquement)	pages 20 et 115 (type 14)	
			Fixations par soudure des manchons de liaison des cannes chauffantes sur manchettes (sauf Fessenheim 1)	pages 21, 23 et 115 (type 15)	
			Plaque guide supérieure des cannes chauffantes	page 59	
			Supportage de la plaque supérieure		
			Plaque guide inférieure des cannes chauffantes (sauf N4)	page 59	
			Supportage de la plaque inférieure (sauf N4)		
			Etanchéité des manchettes en attente	page 37	
		Dispositif d'expansion	Système externe	Tuyauterie d'expansion	
				Fixation par soudure de la tuyauterie d'expansion sur embout de la tubulure	
			Système interne	Tubulure d'expansion	
				Revêtement inox intérieur sur tubulure	
	Fixation par soudure de la tubulure sur fond inférieur				
	Embout inox de la tubulure				
	Fixation par soudure de la tubulure et de l'embout inox (bimétallique)				
	Manchette thermique				
	Fixation par soudure de la manchette thermique sur embout inox type CP0 et CP1 à CP5			pages 24 et 114 (type 4)	

	Dispositif d'aspersion	Système externe	Fixation par soudure de la manchette thermique de type semi-intégral sur embout inox (à partir de CP6)	pages 62 et 114 (type 5)
			Crépine	
			Fixation par soudure crépine sur fond inférieur	
		Système interne	Tuyauterie d'aspersion	
			Fixation par soudure de la tuyauterie d'aspersion sur l'embout de la tubulure	
			Tubulure d'aspersion	
			Revêtement inox intérieur sur tubulure	
			Chemise interne en inox de la tubulure (CP0 et CPY)	page 115 (types 12 et 13)
			Fixation par soudure chemise interne côté embout inox (CP0 et CPY)	
			Fixation par soudure chemise interne côté fond supérieur (CP0 et CPY)	
			Fixation par soudure de la tubulure sur fond supérieur	
			Embout inox de la tubulure	
			Fixation par soudure de la tubulure et de l'embout inox (bimétallique)	
			Manchette thermique	
			Fixation par soudure de la manchette thermique sur embout inox type CP0	pages 25 et 114 (type 1)
	Fixation par soudure de la manchette thermique sur embout inox type CP1 à CP4	pages 39 et 114 (type 2)		
	Fixation par soudure de la manchette thermique de type semi-intégral sur embout inox (à partir de CP5)	Pages 40 à 42 et 114 (type 3)		
	Butées anti vibration de la manchette thermique			
	Fixation par soudures des butées anti vibration sur tubulure			
	Support d'aspersion (coupling)			
	Fixation par soudure du support d'aspersion sur tubulure	page 116 (types 22, 23 et 24)		
	Pomme d'aspersion			
	Fixation de la pomme d'aspersion sur le support d'aspersion			
	vers soupapes de sûreté (3 dispositifs)	Système externe	Tuyauterie d'évacuation	
			Fixation par soudure tuyauterie d'évacuation sur embout de la tubulure	
		Système interne	Tubulure de sûreté	
Revêtement inox intérieur sur tubulure				
Chemise interne en inox de la tubulure (CP0 et CPY)			page 115 (types 12 et 13)	
Fixation par soudure chemise interne côté embout inox (CP0 et CPY)				
Fixation par soudure chemise interne côté fond supérieur (CP0 et CPY)				

			Fixation par soudure de la tubulure sur fond supérieur		
			Embout inox de la tubulure		
			Fixation par soudure de la tubulure et de l'embout inox (bimétallique)	page 43	
		Système de supportage de collecteur de soupape (sauf CP0 et N4)		Supports	page 45
				Fixation par soudures des supports sur virole	
	Dispositif d'évacuation vers ballon de décharge (sauf N4)	Système externe		Tuyauterie d'évacuation	
				Fixation par soudure tuyauterie d'évacuation sur embout de la tubulure	
		Système interne		Tubulure de décharge	
				Revêtement inox intérieur sur tubulure	
				Chemise interne en inox de la tubulure (CP0 et CPY)	page 115 (types 12 et 13)
				Fixation par soudure chemise interne côté embout inox (CP0 et CPY)	
				Fixation par soudure chemise interne côté fond supérieur (CP0 et CPY)	
				Fixation par soudure de la tubulure sur fond supérieur	
				Embout inox de la tubulure	
	Fixation par soudure de la tubulure et de l'embout inox (bimétallique)	page 43			
	Dispositifs de visite	Trou d'homme		Bossage	page 103
				Revêtement inox intérieur du bossage	
				Fixation par soudure du bossage sur fond supérieur	
Plan de joint sur bossage					
Joint					
Presse-joint avec fixation					
Couvercle de trou d'homme					
Système de fixation du couvercle de trou d'homme					
Diaphragme d'étanchéité (sur PQY et N4 si plan de joint endommagé)					
Fixation par soudure du diaphragme d'étanchéité sur bossage (sur PQY et N4 si plan de joint endommagé)					
Dispositifs d'instrumentation (niveau, température, échantillonnage)	Système externe		Tuyauterie de liaison		
			Fixation tuyauterie de liaison sur piquage		
	Système interne		Piquage d'instrumentation		
			Fixation par dudgeonnage du piquage sur virole	page 114 (type 6 et 7)	
			Soudure d'étanchéité du piquage sur virole	page 114 (type 6 et 7)	
pressuriseur	Système de reprise des charges verticales		Jupe support (y compris fixation par soudure longitudinale)		

			Fixation par soudure de la jupe support sur la bride en Y (FSH1)	page 16 (détail A)
			Fixation par soudure de la jupe support sur le fond inférieur (sauf FSH1)	pages 30 (détail A), 159 et 160
			Embase (y compris Fixation par soudures d'assemblage)	
			Fixation par soudure de l'embase sur la jupe support	page 154
			Fixation de l'embase sur le génie civil	
		Système de reprise des charges horizontales	Pattes de fixation des supports anti sismiques (sauf P'4 et N4)	
			Fixation par soudures des pattes de fixation sur virole (sauf P'4 et N4)	
			Supports anti sismiques	
			Fixation des supports anti sismiques sur le génie civil	
		Système de reprise des charges lors de la manutention (CP0 et CPY)	Tourillons de levage	
	Fixation des tourillons sur la virole			
	Confinement thermique	Calorifugeage	Calorifuge fixe	
			Calorifuge démontable	
			Cercles de fixation du calorifuge	
			Fixations des cerces sur la virole	

## Annexe 4.7 : Les spécifications chimiques du milieu primaire

[Stutzmann, 1997]

## Fonctionnement normal

PARAMÈTRE	UNITÉ	VALEUR ATTENDUE	VALEUR LIMITE	FRÉQUENCE ANALYSE	REMARQUES
BORE (STE)	mg/kg	selon neutronique	Voir STE	CONTINU	Les valeurs limites et fréquences d'analyses manuelles sont définies dans les STE en fonction de divers critères. Voir commentaires.
LITHIUM (STE)	mg/kg	Voir FICHE P.1.2		3/S ou J. ou CONTINU	Contrôle manuel 3/S ou continu (par $\lambda$ ). En période de suivi de charge, lors d'un appoint important (dilution), et en cas de dépassement de la valeur attendue en NH <sub>3</sub> , contrôle manuel quotidien ou contrôle continu. DÉPASSEMENTS : FICHES P.1.2 et 1.3. ARRÊTS : FICHE P.1.4.
OXYGÈNE	mg/kg	< 0,010	< 0,10	X	Pas de contrôle O <sub>2</sub> requis puisque l'on est en présence d'hydrogène. DÉPASSEMENTS et T > 120 °C : FICHE P.1.3. T ≤ 120 °C : FICHE P.1.4.
CHLORURE (STE)	mg/kg	< 0,05	< 0,15	S	
FLUORURE (STE)	mg/kg	< 0,05	< 0,15	S	
SULFATE (STE)	mg/kg	< 0,05	< 0,15	M	DÉPASSEMENTS et T > 120 °C : FICHE P.1.3. DÉPASSEMENT VALEUR ATTENDUE : FICHE P.2.2
HYDROGÈNE (STE)	ml/kg (TPN)	25 à 35 (valeur visée)	20 à 50	3/S	Automate : mesure séquentielle. L'hydrogène-mètre doit être alimenté en continu et la mesure effectuée au moins 3 fois par semaine. DÉPASSEMENTS, CAS PARTICULIERS : FICHE P.1.5.
SODIUM (STE)	mg/kg	< 0,1	< 0,2	M	Contrôle également en cas d'augmentation significative <sup>24</sup> Na. DÉPASSEMENTS et T > 120 °C : FICHE P.1.3.
SILICE IONISÉE	mg/kg	< 0,6	< 1,0	M	Valeur limite : voir commentaires.
CALCIUM	mg/kg		< 0,05	M	Fréquence d'analyse accrue en cas de teneurs élevées sur RCP ou REA eau.
MAGNÉSIIUM			< 0,05		
ALUMINIUM			< 0,05		
AMMONIAQUE	mg/kg	< 0,5		OCCASIONNEL	Voir commentaire FICHE P.2.2.

**Annexe 4.8 : Comptabilisation des situations pénalisantes pour le pressuriseur et sa ligne d'expansion****Situation pénalisantes pour le pressuriseur et sa ligne d'expansion**

1A : Passage de l'arrêt à froid à l'arrêt à chaud après rechargement

1B : Passage de l'arrêt à froid à l'arrêt à chaud après intervention

1C : Passage de l'arrêt à froid à l'arrêt intermédiaire aux conditions du RRA

1D : Passage de l'arrêt intermédiaire aux conditions du RRA à l'arrêt à chaud

2A : Passage de l'arrêt à chaud à l'arrêt à froid avec remplissage piscine

2B : Passage de l'arrêt à chaud à l'arrêt à froid sans remplissage piscine

2C : Passage de l'arrêt à chaud à l'arrêt intermédiaire aux conditions du RRA

2D : Passage de l'arrêt intermédiaire aux conditions du RRA à l'arrêt à froid

2E : Passage de l'état nominal en puissance à l'arrêt à chaud puis à l'arrêt intermédiaire aux conditions du RRA (palier < 3h)

**Situation pénalisantes pour le pressuriseur (aspersion)**

46A : Mise en service intempestive de l'aspersion auxiliaire avec l'aspersion principale en service

46B : Mises en service successives de l'aspersion auxiliaire avec l'aspersion principale en service

47 : Mise en service de l'aspersion auxiliaire avec la décharge RCV isolée

## Bilan des situations (%) en 2001 pour le REP 900

Situ	SITU_NB_OCCURRENCES	Circuit	BLA1	BLA2	BLA3	BLA4	BUG2	BUG3	BUG4	BUG5	CHB1	CHB2	CHB3	CHB4		CRU2	CRU3	CRU4
1A	70	RCP	30%	26%	26%	30%	29%	29%	29%	30%	31%	23%	24%	20%	24%	26%	23%	24%
1B	60	RCP	17%	12%	7%	12%	50%	38%	42%	28%	20%	22%	7%	7%	12%	10%	15%	10%
1C	80	RCP	19%	15%	14%	9%	13%	6%	4%	4%	9%	13%	11%	8%	15%	24%	20%	14%
1D	70	RCP	30%	30%	36%	20%	20%	29%	26%	21%	30%	24%	27%	19%	27%	41%	39%	50%
2A	70	RCP	24%	29%	24%	27%	29%	29%	29%	30%	20%	21%	19%	17%	23%	23%	21%	24%
2B	60	RCP	20%	5%	2%	10%	38%	28%	42%	25%	12%	15%	8%	5%	5%	7%	15%	12%
2C	80	RCP	19%	13%	31%	15%	16%	20%	21%	19%	25%	14%	18%	13%	23%	35%	26%	25%
2D	40	RCP	30%	10%	25%	15%	25%	10%	10%	8%	23%	20%	15%	13%	25%	35%	30%	13%
2E	30	RCP	10%	17%	7%	7%	13%	10%	3%	10%	13%	3%	3%	3%	13%	7%	10%	20%
46A	14	AAX	7%	7%	21%	21%	14%	14%	7%	7%	0%	0%	0%	0%	14%	29%	21%	14%
46B	15	AAX	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%
47	4	AAX	0%	50%	0%	25%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	25%	25%	0%	0%	0%

DAM1	DAM2		DAM4	FES1	FES2	GRA1	GRA2	GRA3	GRA4	GRA5	GRA6	SLB1	SLB2	TRI1	TRI2	TRI3		MAX
24%	19%	23%	23%	27%	30%	24%	21%	21%	31%	26%	21%	26%	21%	31%	33%	30%	26%	33%
25%	27%	15%	33%	38%	33%	25%	20%	13%	15%	10%	5%	5%	10%	13%	22%	18%	20%	50%
11%	11%	11%	18%	25%	19%	43%	11%	21%	15%	23%	9%	33%	25%	25%	24%	20%	14%	43%
37%	39%	21%	31%	29%	26%	66%	29%	54%	31%	21%	10%	50%	33%	36%	36%	39%	39%	66%
16%	23%	17%	13%	27%	10%	20%	16%	21%	19%	21%	17%	21%	21%	29%	31%	27%	26%	31%
13%	15%	13%	27%	25%	17%	13%	13%	15%	10%	2%	2%	10%	5%	17%	20%	17%	12%	42%
20%	23%	10%	19%	24%	19%	44%	23%	35%	19%	19%	9%	35%	31%	18%	19%	24%	25%	44%
18%	20%	18%	20%	35%	23%	43%	5%	13%	20%	25%	18%	45%	50%	28%	23%	33%	20%	50%
13%	17%	17%	10%	17%	20%	17%	10%	7%	17%	10%	7%	13%	13%	17%	17%	10%	7%	20%
71%	86%	64%	14%	####	79%	29%	0%	7%	7%	14%	0%	0%	0%	64%	36%	64%	50%	100%
27%	73%	13%	0%	13%	7%	20%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	33%	0%	20%	7%	73%
####	50%	0%	0%	0%	50%	####	####	####	0%	50%	75%	75%	0%	0%	0%	50%	100%	350%

**Extrapolation des situations (%) à 40 ans pour le REP 900 à partir du Bilan 2001**

Situ	SITU_NB_OCCURRENCES	Circuit	Max	BLA1	BLA2	BLA3	BLA4	BUG2	BUG3	BUG4	BUG5	CHB1	CHB2	CHB3	CHB4	CRU1	CRU2	CRU3	CRU4
1A	70	RCP	63%	52%	57%	55%	63%	46%	47%	48%	54%	63%	51%	53%	50%	53%	55%	53%	55%
1B	60	RCP	64%	17%	12%	7%	12%	64%	53%	57%	32%	20%	36%	7%	7%	16%	10%	20%	10%
1C	80	RCP	46%	29%	15%	28%	23%	18%	9%	7%	4%	9%	16%	11%	12%	22%	27%	24%	14%
1D	70	RCP	<b>103%</b>	41%	34%	61%	45%	20%	35%	29%	35%	38%	40%	42%	39%	52%	50%	73%	59%
2A	70	RCP	60%	47%	52%	54%	60%	46%	47%	48%	54%	36%	45%	48%	57%	51%	48%	51%	55%
2B	60	RCP	53%	24%	5%	2%	15%	52%	43%	53%	29%	16%	29%	8%	11%	10%	7%	25%	12%
2C	80	RCP	79%	29%	13%	53%	33%	16%	23%	27%	31%	32%	28%	30%	26%	47%	46%	56%	33%
2D	40	RCP	76%	50%	17%	47%	37%	35%	15%	21%	8%	23%	27%	15%	30%	39%	42%	30%	13%
2E	30	RCP	42%	10%	26%	16%	16%	13%	17%	3%	18%	13%	3%	3%	3%	13%	7%	10%	20%
46A	14	AAX	<b>100%</b>	7%	7%	21%	21%	14%	14%	7%	7%	0%	0%	0%	0%	14%	29%	43%	14%
46B	15	AAX	73%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%
47	4	AAX	<b>533%</b>	0%	<b>119</b>	0%	98%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	<b>112</b>	96%	0%	0%	0%

DAM1	DAM2		DAM4	FES1	FES2	GRA1		GRA3	GRA4	GRA5	GRA6		SLB2		TRI2	TRI3	
42%	37%	49%	46%	47%	47%	45%	36%	36%	62%	56%	49%	48%	40%	55%	57%	56%	49%
29%	31%	19%	38%	45%	37%	33%	28%	13%	24%	15%	5%	14%	19%	13%	22%	23%	24%
14%	14%	15%	28%	30%	24%	45%	14%	21%	15%	42%	13%	46%	35%	37%	30%	30%	17%
65%	75%	40%	54%	34%	32%	<b>103%</b>	36%	91%	43%	39%	19%	72%	37%	56%	50%	57%	58%
30%	37%	36%	24%	41%	16%	40%	33%	43%	45%	43%	31%	40%	36%	52%	60%	57%	52%
17%	23%	18%	27%	28%	20%	13%	13%	15%	19%	2%	2%	23%	14%	17%	20%	21%	12%
38%	35%	23%	32%	31%	21%	79%	32%	70%	25%	30%	9%	55%	38%	26%	28%	37%	35%
30%	20%	18%	40%	55%	28%	48%	5%	13%	20%	71%	34%	58%	76%	45%	29%	45%	27%
30%	42%	25%	10%	23%	27%	17%	10%	7%	26%	20%	28%	13%	13%	33%	17%	10%	16%
71%	86%	64%	14%	<b>100%</b>	79%	29%	0%	7%	7%	14%	0%	0%	0%	81%	36%	64%	50%
27%	73%	13%	0%	13%	7%	20%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	65%	0%	20%	7%
<b>533%</b>	<b>113%</b>	0%	0%	0%	50%	<b>250%</b>	<b>125%</b>	<b>100%</b>	0%	50%	75%	75%	0%	0%	0%	50%	<b>233%</b>

**Analyse de la consommation des situations du REP 900 pour 2001**

SITU	N	NB	OC	par an	Circuit	BLA1	BLA2	BLA3	BLA4	BUG2	BUG3		BUG5	CHB1	CHB2	CHB3	CHB4	CRU1	CRU2	CRU3
1A		70	1,75	RCP	1	1	1			1	1	1		1	1	1		1	1	2
1B		60	1,5	RCP						1	1	1								1
1C		80	2	RCP						1								1	1	
1D		70	1,75	RCP							1						1	1		
2A		70	1,75	RCP	1	1		1			1	1	1		1	1	1	1	1	1
2B		60	1,5	RCP							1	1					1			1
2C		80	2	RCP														1		
2D		40	1	RCP						1							1	1	1	
2E		30	0,75	RCP							1		1							
		4	0,1	AAX													1	1		

DAM1	DAM2	DAM3	DAM4	FES1	FES2	GRA1	GRA2	GRA3	GRA4	GRA5	GRA6	SLB1	SLB2	TRI1	TRI2	TRI3	TRI4	Total
1		1	1		1	1			1	1	1	1		1	1		1	27
							1						1				1	7
1													1					5
2			1			1											2	10
				1				1	1				1	1	1	1	1	23
1													1					7
2						1											2	7
																		4
																		2
1																		3

Tranches en base

Tranches homologues

Situations sensibles

## Analyse de la consommation des situations du REP 900 pour 2002

SITU	N	NB	OC	par an		BLA1	BLA2	BLA3	BLA4	BUG2	BUG3	BUG4	BUG5	CHB1	CHB2	CHB3	CHB4	CRU1	CRU2	CRU3	CRU4	
1A		70	1,75	RCP			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1B		60	1,5	RCP				1														1
1C		80	2	RCP								1		1							1	
1D		70	1,75	RCP			3			1	2							2			1	1
2A		70	1,75	RCP		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2B		60	1,5	RCP				1													1	1
2C		80	2	RCP			3				2								2			
2D		40	1	RCP								1		1				1				
2E		30	0,75	RCP						1				1				1				
47		4	0,1	AAX																		

DAM1	DAM2	DAM3	DAM4	FES1	FES2	GRA1	GRA2	GRA3	GRA4	GRA5	GRA6	SLB1	SLB2	TRI1	TRI2	TRI3	TRI4	Max	Max%
1		1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	114
									2	1				1				2	133
				1														1	50
					1			1					1	1	1	1		3	171
				2	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	114
									2				1	1				2	133
					1			1		1			1					3	150
				1														1	100
																		1	133
																		0	0

Tranches en base

Tranches homologues

Situations sensibles

**Annexe 4.9 : Les contrôles des différentes zones et soudures du pressuriseur et les changement effectués par rapport au PBMP PB900-AM400-01 indice 1 pour tenir compte de l'arrêté d'exploitation du 10/11/99 [Bordes,2000]**

<b>Zone ou soudure</b>	<b>Contrôles</b>	<b>Fréquence</b>
Soudure dôme/trou d'homme	Gammagraphie simple paroi	A chaque VC
Soudure dôme/tubulure d'aspersion		
Soudure dôme/tubulures décharge et soupapes		
Soudure circulaire dôme/virole	Gammagraphie simple paroi	A chaque VC
Soudure circulaire fond/virole	Ultrasons	A chaque VC
Soudure fond/tubulure d'expansion	Gammagraphie simple paroi	A chaque VC
Soudure bride Y/virole (FESSENHEIM)	Ultrasons	A chaque VC
Soudure bride Y/jupe (FESSENHEIM)	Ressuage	A chaque VC
Soudure bride Y/fond (FESSENHEIM)	Ultrasons	A chaque VC
Soudures des cannes chauffantes : cannes/brides brides ou bouchons/manchettes manchettes /fond	Surveillance acoustique de fuite pendant épreuve hydraulique  Examen visuel en cas de fuite (localisation)	A chaque VC
Surface interne des manchettes des cannes chauffantes au droit de la traversée du fond	Courants de Foucault (et examen télévisuel si nécessaire)	Lors du remplacement des cannes chauffantes
Goujons	Ultrasons	A chaque VC et 1 entre VC
	Visuel	A chaque démontage avec CR uniquement en cas d'incident
Ecrous	Visuel	A chaque VC et 1 entre VC
Ligaments	Ultrasons	A chaque VC En cas d'alerte sur les goujons (partie fileté basse)
Taraudages	Visuel	En cas d'alerte sur les goujons (partie fileté basse)
Revêtement interne	Examen télévisuel	A chaque VC et 2 entre VC
Soudure embout de sécurité/tubulure d'expansion (LBM)	Gammagraphie double paroi	A chaque VC et 2 entre VC
	Ressuage	A chaque VC et 1 entre VC
Soudure manchettes thermiques d'expansion FESSENHEIM, BUGEY, CP1 à CP5 À partir de CP6	Ultrasons	A chaque VC et 2 entre VC
	Gammagraphie double paroi	
Soudure embout de sécurité/tubulures décharge et soupapes (LBM)	Gammagraphie double paroi	A chaque VC et 1 entre VC
	Ressuage	A chaque VC et 1 entre VC
Soudure embout de sécurité/tubulure d'aspersion (LBM)	Gammagraphie double paroi	A chaque VC et 2 entre VC
	Ressuage	A chaque VC et 1 entre VC
Soudure manchettes thermiques d'aspersion FESSENHEIM, BUGEY, CP1 à CP4 À partir de CP5	Gammagraphie double paroi	A chaque VC et 2 entre VC
Soudure jupe/fond (BUGEY et CPY)	Ressuage	A chaque VC
	Ultrasons	A chaque VC et 1 entre VC
Soudure piquages d'instrumentation	Visuel dès que la pression d'épreuve atteinte	A chaque VC
Soudure support du tore d'échappement /première virole (CPY)	Ressuage	A chaque VC et lors de l'arrêt suiv ouverture de soupape de sûre
Soudures longitudinales viroles	Ultrasons ou	-
	Gammagraphie simple paroi	
Soudures virole/virole	Ultrasons ou	-
	Gammagraphie simple paroi	
Soudure des supports anti-sismiques	Ressuage	-



Supprimé



périodicité modifiée



Ajouté

**Les contrôles des différentes zones de la LEP**

<b>LEP</b> - Soudure basse du coude à 90°	Ultrasons ou Gammagraphie simple paroi	A chaque VC
<b>LEP</b> - Soudures circulaires de la LEP	Gammagraphie simple paroi	A chaque VC et 1 entre VC
<b>LEP</b> - manchette thermique soudée du piquage sur la branche chaude	Ultrasons	A chaque VC et 1 entre VC

## Annexe 4.10 : Analyse d'un extrait du REX SAPHIR entre 01/01/80 et 01/06/01

Type	Tranche	Année	Résumé
<b>Corps migrants</b>	CRU 3	1998	ITV interne du pressu montre des morceaux de joints spirale dans le fond au niveau de la crépine
	CHIB2	1996	ITV, découverte de 7 corps migrants
	SLTB2	1996	ITV, propreté de la crépine, corps migrants
	GRA 2	1991	présence d'un boulon à l'intérieur du pressu au droit de la soudure
	BLA4	1991	corps étranger (morceau de joint) sur plaque supérieure de maintien des cannes chauffantes
	CHIB4	1990	cops étranger au fond de l'espace annulaire entre anneau intermédiaire et manchette thermique
	CHIB1	1987	L=60mm, diamètre 3mm sur plaque sup cannes chauffantes
<b>CND</b>	Plusieurs		indications dans soudure bi-métallique, soudure de manchette (manques de fusion, DIG), soudure jupe sur fond, attache chemise sur anneau intermédiaire, interface acier noir/revêtement, liaison beurrage sur tubulure
	BUG4	1997	soudure dame - virole, indications transversales
	FES1	1993	coloration en bord des bandes de feuillard, 140° sur la hauteur de la phase vapeur
	FES2	1992	5 Taraudages présentent des piqûres de corrosion
	TRI1	1987	manchette de la ligne d'aspersion, zone d'érosion au niveau du trou d'évent de la manchette estimée à 75% de l'épaisseur
<b>Capteurs</b>	CRU4	2000	Dérive à la hausse de la valeur donnée par le capteur pression pressu RCP 013 MP
	SLTB 1	1999	niveau bas pressu car capteur RCP 007 MN a provoqué fermeture RCV46VP. Du coup, déclenchement du seuil de protection RCP 11 MN
	SLTB 1	1999	ouverture anormale de la vanne d'aspersion pressu RCP 001 VP. Maintien ouverture à environ 20% car positionneur décalé. Surveillance renforcée jusqu'au prochain arrêt
	SLTB2	1998	étalonnage du capteur RCP 011 MN
	FES1	1984	passage à la PCN quire à anomalie de fonctionnement de la régulation de niveau pressu (module consigne)
<b>Exploitation</b>	BLA4	1986	Alarme chaine KRT 009 MA lors de l'ouverture du trou d'homme Teneur en XE 133 importante dans le primaire
	GRA6	1994	Dépassement spécification d'écart entre la teneur en Bore du CPP et du pressu phase liquide, spec écart inf à 50 ppm mesure de 53 et 51 ppm

	BUG4	1995	remplissage pressu pour redémarrage, de l'eau a été introduite dans la gaine EBA suite à lignage de l'évent pressu non conforme Cette présence d'eau a perturbé le fonctionnement de la chaîne KRT 057 MA
	SLTB1	1999	Après collapsage de la bulle, remontée de l'H2 dissous au RCP de 33cc/Kg à 18 cc/Kg (spec=35cc/Kg à 170°C)
	SLTB 1	1999	alarme niveau bas pressu lors de passage AN/GV à AN/RRA
	SLTB2	2000	Baisse de niveau primaire RCP 095 MN (niveau cuve) alors que ce dernier devait indiquer une cote maxi(cuve pleine). Le lignage et le fonctionnement du capteur étaient corrects, la baisse de niveau était réelle, générée par la formation d'une bulle de gaz sous le couvercle. Lors de l'éventage, un appoint de 21 m3 a été nécessaire pour ramener le niveau pressu à sa cote initiale.
	SLTB2	2000	éclatement d'une membrane RDP consécutivement à ouverture soupape SEBIM
<b>Facteurs humains</b>	GRA6	1999	GMPP arrêtés pour dépressuriser, CPP à 10 bars mais chaufferettes non arrêtées. Température pressu monte à 195°C, comme CPP est à 40°, le delta est de 155°C (110° max à respecter)
	CHIB4	1999	Après ilotage réussi, la turbine venant d'être découplée, l'opérateur a passé GCT en mode opérateur, d'où fermeture complète GCT, insertion complète du groupe R en dessous de sa limite très basse, tassement des niveaux GV et refroidissement excessif du primaire jusqu'à 277°C. Contraction du niveau pressu à une cote inférieure à 14% et baisse de puissance à 0,8%
<b>Défauts de fabrication</b>	BUG4	1990	nombreuses traces de soudure sur le corps du pressu au niveau de la ceinture de maintien des soupapes SEBIM
	TRI4	1992	Zone de porosité sur 3 soudures de support de tore sur le pressu, défauts de fabrication
	TRI3	1996	TUY 103, usinage des cales E 58-60 et 64 de 1mm
	TRI1	1997	TUY 103 jeu JR61 non conforme repris par usinage de 0,5mm après basculement mécanique (verrins) du PRZ pour dépose et repose de la cale
<b>Maintenance</b>	BUG2	1990	vitre d'un projecteur cassé dans le pressu (chantier SEBIM) morceaux ôtés par aspirateur télévisuel
	BUG3	1996	Dépassement du seuil iode 131 (100 MBQ/T) après ouverture du trou d'homme pressu
<b>Visserie</b>	Plusieurs		non conformité des taraudages trou d'homme arrachement ou écrasement de filets sur goujons hors tolérance d'allongement

**Annexe 4.11 : Retour d'expérience étranger : événements importants**

<b>Tranche</b>	<b>Pays</b>	<b>Type</b>	<b>Puissance (Mwe)</b>	<b>Date</b>	<b>Action</b>	<b>Raison</b>
Fort Calhoun 1	USA	PWR	476	2003	Remplacement	Augmentation de puissance. Manchettes de cannes chauffantes en alliage 600
San Onofre 2 et 3	USA	PWR	2 x 1070		Intention de remplacement	
Righals 3 et 4	Suède	PWR	2 x 915	2002-2003	travaux de rénovation. Réparation des embouts de sûreté (2002 pour la tranche 4 et 2003 pour la tranche 3)	

### Annexe 4.12 : Retour d'expérience analogue

#### Cas de fissuration par CSC des aciers inoxydables austénitiques

Les cas de fissuration par CSC recensés en milieu industriel au 1er septembre 2000 présentent les caractéristiques suivantes :

- Aciers inoxydables austénitiques de type AISI 304, 304L, 316, 316L, et Z2 CN 19-10 N
- Amorçage dans des zones écrouies, caractérisées par une forte dureté
- Morphologie intergranulaire ou transgranulaire
- Température plutôt élevée (>320°C)
- Temps plutôt long (>50 000 h)
- Matériaux non sensibilisés
- Milieu non pollué

Tranche	Matériel	Matériau	Durée (h)	Température (°C)	Morphologie	Profondeur maximale (mm)	Dureté de surface	Profondeur écrouie (µm)
Gravelines 6	Epingle de thermocouple	Z2 CN 19-10 N	50 369	320	Intergranulaire	1,2	370 HV <sub>1</sub>	ND
Tricastin 3	Tubes d'échangeur RCV	304	70 000	140	Intergranulaire et transgranulaire	0,37	380 HV <sub>0,05</sub>	480
Tricastin 1	Bossage de ligne d'éventage du pressuriseur	304L	120 174	345	Transgranulaire	10	340 HV <sub>0,1</sub>	400
Surry 1	Piquage de pressuriseur	316	120 000	350	Transgranulaire	3	280 HV	300
Chouz B2	Cannes chauffantes du pressuriseur	316L	5000	360	Intergranulaire	1,9	380 HV <sub>0,05</sub>	120
Tricastin 1	Epingle de thermocouple	Z2 CN 19-10 N	?	320	Intergranulaire	1,2	396 HV <sub>1</sub>	Epaisseur épingle
Technicatome	Cannes chauffantes du pressuriseur	316L	< 12 000	360	Intergranulaire	2	409 HV <sub>0,05</sub>	200 à 600 µm

### Retour d'expérience mondial de fatigue thermique

- Ces données sont relatives à des fuites observées sur la partie primaire des seules centrales PWR. 13 fuites (avec fissures traversantes ) ont été observées sur 3509 réacteurs PWR x ans.
- Ces fuites ont été observées sur des tuyauteries en acier inoxydable de diamètre inférieur à 25 cm.

**Table des données d'Atwood – Fuites dues à la fatigue thermique dans les centrales PWR  
(observation au 31/05/1998)**

Age (années)	Réacteurs x ans	Fuites dues à la fatigue thermique
0- 1	215.2	Civaux 1, 5/98
2	211.6	
3	210.2	
4	208.6	
5	206.5	Crystal River 3, 1/82
6	202.3	
7	200.4	Farley, 12/87
8	198.0	
9	193.6	
10	188.3	
11	178.1	
12	167.3	Dampierre 2 9/92
13	153.5	
14	136.3	Tihange 1 6/88 ; Genkai 1 6/88 ; Loviisa 5/94
15	121.8	
16	110.0	
17	100.9	Dampierre 1 12/96 ; Loviisa 2 1/97
18	86.4	Obrigheim /86
19	74.7	Biblis B 2/95
20	70.3	
21	63.4	
22	55.3	Three Mile Island 1 9/95
23	47.3	
24	39.3	Oconee 2 4/97
25	25.5	
26	16.3	
27	11.2	
28	8.2	
29	5.4	
30	2.7	
31	0.2	

### Traitement des données de retour d'expérience de fatigue thermique

- Il est clair que la fréquence d'occurrence des fuites dues à la fatigue thermique croît avec l'âge et que c'est statistiquement significatif.
- Atwood précise que cette fréquence d'occurrence double tous les 8 ans mais qu'il est difficile d'extrapoler cette conclusion au delà des 25 ans d'âge.
- La table ci-dessous compare différentes méthodes d'analyse de ces données. On constate un certain agrément entre toutes ces méthodes, malgré un nombre de données complètes faible et un fort taux de censure.

**Table - Comparaison de différentes modélisations statistiques , fuites dues à la fatigue thermique, échantillon d'Atwood.**

Modélisation	Ref.	$\tau_0$ (ans)	$\lambda_0$ (an <sup>-1</sup> )	$\lambda_1$ (an <sup>-1</sup> ) or $1/\eta$	$\beta$	Vieillesse ment	Observations
IBTV	Clarotti et al, 2002	11.2 ± 3.2	2.3 x 10 <sup>-3</sup> ± 1.1 x 10 <sup>-3</sup>	9.2 x 10 <sup>-3</sup> ± 9.0.10 <sup>-3</sup>	Step	Oui, léger	–
Modèle de Bertholon_	Bertholon et al, 2000	13.9	1.4 x 10 <sup>-3</sup>	8.8 x 10 <sup>-3</sup>	$\hat{\beta} = 1$	oui	–
IBW	Clarotti et al, 2002	–	–	8.5 x 10 <sup>-3</sup>	1.36	léger	$\beta$ : [1.07; 1.61]
Atwood modèle loglinéaire	Atwood, 1999	8	–	–	–	oui	Fréquence doublée tous les 8 ans
Atwood modèle puissance	Atwood, 1999	8	–	–	1.32	oui	–
actuariat	Clarotti et al, 2002	10 to 15	1.45 x 10 <sup>-3</sup>	8.85 x 10 <sup>-3</sup>	–	oui	–

$\tau_0$  (ans) désigne l'instant de début du vieillissement

- Tous les modèles concluent à un vieillissement , qu'on peut affirmer léger.
- Le modèle bayésien IBTV en échelon donne un début de vieillissement entre 8 et 14 ans d'âge . Les autres modèles donnent sensiblement les mêmes valeurs pour cet instant d'initiation de 8 ans à 13.9 ans.
- Les paramètres de forme des modélisations de Weibull (le modèle bayésien IBW et le modèle fréquentiel puissance) sont de l'ordre de 1.3 – 1.4, traduisant un léger vieillissement.

**Annexe 4.13 Identification des problèmes potentiels concernant le DL pressuriseur  
à l'horizon de 60 ans [Billy et al., 2003]**

N° du couple	Problème	Mécanisme / Mode	Zone ou défaut	(*) Z (zone), E (événement), O (option) Si non retenu, raison de ce choix
1	Réglementaire	Fatigue	LEP, premier coude sous le pressuriseur	Z1
2	Réglementaire	Fatigue	ZS de la tubulure d'aspersion	Z2 (CP0+ CP1 à CP4)
3	Réglementaire	Fatigue	ZS de la tubulure d'expansion	Z3 (CP0+CP1 à CP5)
4	Réglementaire	Fatigue	Peau interne des manchettes de cannes chauffantes	Retenu, non traité dans l'indice B (Z6)
5	Réglementaire	Fatigue à grand nombre de cycles, changement de courbes de fatigue	Piquage branche chaude, LEP	E13
6	Fissure	Fatigue	-	E21, E22, E23
7	Fissure	CSC inox	Enveloppe des cannes chauffantes	Retenu (Z4 et Z5), non traité dans l'indice B, attendre les résultats du projet T4-01-03
8	Fuite au niveau de la ZS des manchettes des cannes chauffantes	Fatigue	Manchettes de cannes chauffantes	Retenu pour le scénario du cas-test de Durabilité REP
9	Fuite au niveau des cannes chauffantes	Fusion suite à arc électrique	Canne chauffante	Non retenu mais il y a du REX (42 jours d'indisponibilité PALUEL 3 en 2003)
10	Réglementaire	Rupture brutale	Virole soumise aux aspersion, Coin de la tubulure d'aspersion	O3, O31
11	Présence de défauts de fabrication	DSR	Viroles	Non retenu. Remarque : étudié dans JOSO
12	Décohésions Inter Granulaires (DIG)	Corrosion atmosphérique	LBM	Non retenu (résolu)
13	Anomalie de dilution	Fabrication	LBM	Non retenu. Remarque : étudié dans JOSO et déjà intégré dans les calculs mécaniques selon DPN
14	Dégradation	?	Interface eau-vapeur	Non retenu (pas d'éléments)
15	Réglementaire	Séisme	-	Non retenu (OK avec réglementation actuelle pour 60ans, toujours vrai pour les VD3 (évolutions réglementaires) ?
16	Facteur Humain / Logistique	-	-	Non retenu (pas d'éléments)
17	Remplacement pressu (+LEP)	-	-	O81, O82
18	Fissure	Fatigue-corrosion	-	À instruire ultérieurement
19	Rupture brutale	Vieillessement th	virole	Jugé secondaire (cf. annexe 2)

(\*) La dernière colonne du tableau 1 indique les numéros des zones, événements ou options associés aux problèmes identifiés lorsqu'ils ont été retenus pour la rédaction de ce document. Pour les problèmes non retenus, un bref commentaire justifie la raison de ce choix. Cette colonne doit être lue à la lumière de l'ensemble du document puisqu'elle permet de confronter ce qui a été étudié (en gras) avec l'ensemble de ce qui aurait pu l'être dans le cadre de ce DL.

## Annexe 4.14 : AMDE pressuriseur suivant le GALL

Composant	Matériau	Mécanisme
Virole, peau interne	alliage 600 alliage 82 ou 182	<ul style="list-style-type: none"> <li>fatigue</li> <li>CSC, chargements cycliques</li> </ul>
Virole, peau externe	acier faiblement allié	perte d'épaisseur, corrosion par acide borique
Ligne d'aspersion	alliage 600 moulé	<ul style="list-style-type: none"> <li>fatigue</li> <li>CSC, fissures, PWSCC</li> <li>perte de ténacité, fragilisation par vieillissement thermique</li> </ul>
Buse d'aspersion	acier au C et revêtement acier inox	<ul style="list-style-type: none"> <li>fatigue</li> <li>CSC, fissures</li> </ul>
Piquage de la ligne d'expansion	acier au C et revêtement acier inox	fatigue
Manchettes thermiques	alliage 600	fatigue
Traversées	alliage 600  alliage 600 et soudure en inconel 182	<ul style="list-style-type: none"> <li>fatigue</li> <li>CSC, fissures</li> <li>PWSCC</li> </ul>
Embouts de sécurité	acier inox	<ul style="list-style-type: none"> <li>fatigue</li> <li>CSC, fissures</li> </ul>
Buse d'expansion	<ul style="list-style-type: none"> <li>acier au C et revêtement acier inox</li> <li>acier moulé</li> <li>acier moulé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CSC, fissures</li> <li>CSC, fissures</li> <li>perte de ténacité, fragilisation par vieillissement thermique</li> </ul>
Trou d'homme et brides	acier faiblement allié ou inox ou 82, 182	<ul style="list-style-type: none"> <li>CSC, fissures, PWSCC</li> <li>corrosion par acide borique, perte d'épaisseur</li> </ul>
Trou d'homme et boulon d'assemblage	acier à haute résistance mécanique faiblement allié	<ul style="list-style-type: none"> <li>CSC, fissures</li> <li>corrosion par acide borique, perte d'épaisseur</li> <li>perte de serrage, relaxation</li> </ul>
Gaines et manchettes des cannes chauffantes	acier inox ou alliage 600	<ul style="list-style-type: none"> <li>fatigue</li> <li>fissures, CSC ou PWSCC</li> </ul>
Jupes support, keys et shear lugs support intégral	acier au C acier au C	fatigue
		<ul style="list-style-type: none"> <li>perte d'épaisseur, corrosion par acide borique</li> <li>fissures, chargements cycliques</li> <li>fatigue</li> </ul>

En gros, si le composant est en acier inox, on a CSC et s'il est en inconel 600, on a Primary Water Stress Corrosion Cracking.

Annexe 4.15 : Les facteurs d'usage des différentes zones et soudures du pressuriseur

Zone ou soudure	Facteur d'usage (ou d'amorçage)		
	Calculés par Framatome lors de la conception à 40 ans [Bordes,2000]	calculés à partir des dossiers de situations Révision F (1988) à 40 ans [Grosgeorge, 2001]	calculés en 11/2001 à partir des dossiers de situations observées SEPTEN
Soudure dôme/trou d'homme	0,13	<b>0,57</b>	Voisin de 0,5 CP0
Soudure dôme/tubulure d'aspersion CP1 à CP 4 A partir de CP5		-	<b>0,82</b> 0,45
Soudure dôme/tubulures décharge et soupapes		0,46	<0,5 CP0
Soudure circulaire dôme/virole	0,001	<b>0,53</b>	Voisin de 0,5 CP0
Soudure circulaire fond/virole	0,46		-
Soudure fond/tubulure d'expansion	0,31	-	0,5<Fu<0,55, Fa >1, CP1 à CP5
Soudures des cannes chauffantes : cannes/brides	0	-	-
brides ou bouchons/manchettes	0	-	-
manchettes /fond	<u>0,05</u>	<u>0,05</u>	Fa>1
Surface interne des manchettes des cannes chauffantes au droit de la traversée du fond	<b>0,97</b>	<b>0,97</b>	-
Goujons	<b>0,57</b>	-	-
Ecrous	-		-
Ligaments	0		-
Taraudages	0,05		-
Revêtement interne	<b>0,53</b>		-
Soudure embout de sécurité/tubulure d'expansion (LBM)	0,02	<b>0,56</b> C1-C5 0,11 à partir de C6	0,5<Fu<0,55, Fa >1, CP1 à CP5
Soudure manchettes thermiques d'expansion FESSENHEIM, BUGEY, CP1 à CP5 À partir de CP6	<u>3,6</u> 0,49	<b>0,64</b> 0,49	0,5<Fu<0,55, Fa >1 -
Soudure embout de sécurité/tubulures décharge et soupapes (LBM)	0,46	0,46	-
Soudure embout de sécurité/tubulure d'aspersion (LBM)	0,1	<b>0,77</b> C1-C4 <b>0,56</b> à partir de C5	0,51 CP1 à CP4
Soudure manchettes thermiques d'aspersion FESSENHEIM, BUGEY, CP1 à CP4 À partir de CP5	<u>1,21</u> 0,28	0,28 0,05	- 0,25
Soudure jupe/fond (BUGEY et CPY)	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>	-
Soudure piquages d'instrumentation	0,27	0,12	Potentiellement Fa>1 CP0
Virole près des supports latéraux	-	<b>0,53</b>	-
Virole près des supports de soupapes	-	<b>0,57</b>	-
Soudures longitudinales viroles	<b>0,53</b>	-	-
Soudures virole/virole	0,25	-	-
Soudure des supports anti-sismiques	0,02	-	-



**Annexe 5 : Document 3, Synthèse des résultats  
de la démarche d'anticipation**



# AVISE : une démarche d'Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts

*Application au pressuriseur des centrales 900 MWe et à sa ligne  
d'expansion pour 60 ans d'exploitation*

Document 3 : « Synthèse des résultats de la démarche  
d'anticipation »

Coordinateur : Leïla BOUZAIËNE

E-Mail : leila@lgi.ecp.fr

Octobre 2004 (Mise à jour en Janvier 2005)



# Table des matières

## 1. Identification des mécanismes de dégradation potentiels

## 2. Evaluation de la criticité des mécanismes de dégradation potentiels en fonction de la pertinence et de la gravité

## 3. Evaluation de la maintenance et identification des parades potentielles pour quelques triplets critiques identifiés

*3.1 Triplet 1 : Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion/Fatigue thermique/Fissuration*

*3.2 Triplet 2 : Piquage branche chaude / Fatigue à grand nombre de cycles / Faïençage*

*3.3 Triplet 3 : Piquages (en acier 16 MND5)/Vieillessement thermique/Perte de caractéristiques des matériaux*

Ce document présente les résultats obtenus lors de l'application de la démarche AVISE, Anticipation du Vieillessement par Interrogation et Stimulation d'Experts, au pressuriseur des centrales 900 MWe et à sa ligne d'expansion pour 60 ans d'exploitation.

Ses résultats ont été obtenus grâce à la participation de plusieurs experts, qui se sont appuyés dans leur expertise sur un certain nombre d'informations regroupées dans un document intitulé « Document 2 : Informations pour l'anticipation ».

Pour connaître le contexte et les objectifs de cette démarche, il est possible de se référer au document intitulé « Document 1 : Présentation de la démarche d'anticipation, son contexte et ses objectifs » est disponible.

## 1. Identification des mécanismes de dégradation potentiels

42 triplets Zone/Mécanisme/modes ou effets du vieillissement ont été identifiés et validés par l'ensemble des experts participant. Le tableau 1, ci-dessous présente sur chaque ligne : la zone, le mécanisme de dégradation, le mode ou effet du vieillissement et un possible enchaînement de cause. Par exemple, l'apparition du triplet 3 peut entraîner celle des triplets 4 et 5.

**Tableau 1 : Triplets Zone/Mécanisme/modes ou effets du vieillissement potentiels pour le pressuriseur et sa LEP.**

N°	Zone	Mécanisme	Mode de ruine ou effet du vieillissement	enchaînement de causes
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	Perte d'épaisseur	
2	Ensemble de l'enveloppe externe	Fatigue mécanique	Fissuration	
3	Ensemble de l'enveloppe externe	Vieillessement thermique	Perte de caractéristiques des matériaux, réduction de la résistance à la rupture	4, 5
4	Ensemble de l'enveloppe externe	Vieillessement thermique	Déchirure ductile (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)	
5	Ensemble de l'enveloppe externe	Vieillessement thermique	Rupture brutale (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)	
6	Ensemble de l'enveloppe externe dé calorifugée	Corrosion Atmosphérique	Perte d'épaisseur	
7	Enveloppe interne (revêtement inox)	Corrosion par piqûres	Perte de matière : apparition de petits cratères, Percement	8, 12, 13
8	Enveloppe interne (Mécanisme actif dans les phases d'arrêt)	Corrosion par piqûres	Fissuration	
9	Enveloppe interne (revêtement inox)	Usure par corps migrants	Arrachement	
10	Enveloppe interne (surtout à l'interface liquide-vapeur)	Fatigue à grand nombre de cycles	Faïençage	
11	Enveloppe interne (zone de variation de l'interface liquide -vapeur)	Corrosion due à un milieu bi-phasique	Fissuration, piqûres	
12	16MND5 (si percement préalable du	CSC	Fissuration	

	revêtement)			
13	16MND5 (si percement préalable du revêtement)	Fragilisation sous H2	Rupture brutale	
14	Ensemble des zones en inox écroui dont dureté HV > 300	CSC	Fissuration	
15	Ensemble des zones en inox (Mécanisme actif dans les phases d'arrêt.)	Corrosion inter-cristalline	Fissuration	
16	Zone entre manchettes et cannes chauffantes	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	Perte de matériau	17
17	Zone entre manchettes et cannes chauffantes	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	Fissuration	
18	Zone entre cannes chauffantes et plaques de maintien	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	Perte de matériau	19
19	Zone entre cannes chauffantes et plaques de maintien	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	Fissuration	
	LBM	Corrosion Atmosphérique	Fissuration	
21	Manchettes thermiques	Fatigue corrosion	Fissuration	
22	Manchettes de cannes chauffantes	Fatigue corrosion	Fissuration	
24	Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion	Fatigue thermique	fissuration	
25	Zones où arrive un fluide de température différente	Fatigue thermique	Fissuration	
26	Tous les piquages	Fatigue mécanique	Fissuration	
27	Piquage inox	Fatigue thermique	Fissuration	
28	Piquages inox	CSC	Fissuration	
29	Piquages (tout ce qui est en 16MND5)	Vieillessement thermique	Perte de caractéristiques des matériaux, réduction de la résistance à la rupture	30, 31
30	Piquages (tout ce qui est en 16MND5)	Vieillessement thermique	Déchirure ductile (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)	
31	Piquages (tout ce qui est en 16MND5)	Vieillessement thermique	Rupture brutale (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)	
32	Piquage branche chaude	Fatigue à grand nombre de cycles	Faïençage	
33	Goujons	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	perte de matériaux	34
34	Goujons (suite à fuite d'acide borique)	CSC	Fissuration	
35	Goujons	Relaxation précontrainte	Perte de caractéristiques des matériaux	
36	Boulons, joints, filetages	Matage	Perte d'étanchéité	
37	Boulons	Relaxation précontrainte	Desserrage	
38	Buse d'aspersion	Erosion	Perte de matériaux	

39	Trou d'homme	Grippage	Blocage	
40	Trou d'homme	Vieillessement	Perte des caractéristiques des joints, fuite	
41	LEP	Fatigue corrosion	Fissuration	
42	Zone sans pente de la LEP	Stratification thermique	Faïençage	

- Un certain nombre de situations accidentelles pouvant accélérer le vieillissement ont été aussi identifiées (voir le tableau 2), cependant elles ne seront pas prise en compte dans la suite de cette étude d'anticipation.

**Tableau 2 : Situations accidentelles pour le pressuriseur et sa LEP.**

Zone	Situation accidentelle
Jupe support	Séisme
Pressuriseur (Phase vapeur)	Explosion
Totalité du pressuriseur + LEP	Agressions externes : chutes d'avions Agressions internes : explosion d'une pompe
Manchette de cannes chauffantes	Amorçage électrique, conduisant à échauffement
	Echauffement, conduisant à fissuration

## 2. Evaluation de la criticité des mécanismes de dégradation potentiels en fonction de la pertinence et de la gravité

Le tableau 3 ci-dessous, donne la criticité des mécanismes de dégradation potentiels en fonction de la pertinence et de la gravité

**Tableau 3 : Evaluation de la criticité des mécanismes de dégradation potentiels, en fonction de la pertinence et de la gravité.**

N°	Zone	Mécanisme de dégradation	Pertinence	Gravité	Criticité
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	2	2	2
2	Ensemble de l'enveloppe externe	Fatigue mécanique	1	3	2
3	Ensemble de l'enveloppe externe	Vieillessement thermique	2	3	3
4	Ensemble de l'enveloppe externe décalorifugée	Corrosion Atmosphérique	1	2	1
5	Enveloppe interne (Mécanisme actif dans les phases d'arrêt)	Corrosion par piqûres	1	3	2
6	Enveloppe interne (revêtement inox)	Usure par corps migrants	1	2	1
7	Enveloppe interne (surtout à l'interface liquide-vapeur)	Fatigue à grand nombre de cycles	2	3	3
8	Enveloppe interne (zone de variation de l'interface liquide - vapeur)	Corrosion due à milieu bi-phasique	1	3	2
9	16MND5 (si percement préalable du revêtement)	CSC	2	3	

10	16MND5 (si percement préalable du revêtement)	Fragilisation sous H2	2		3
11	Ensemble des zones en inox écroui dont dureté HV > 300	CSC	2	2	2
12	Ensemble des zones en inox (Mécanisme actif dans les phases d'arrêt.)	Corrosion inter-cristalline	1	2	1
13	Zone entre manchettes et cannes chauffantes	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	2	1	1
14	Zone entre cannes chauffantes et plaques de maintien	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	2	1	1
15	LBM	Corrosion Atmosphérique	2	2	2
16	Manchettes thermiques	Fatigue corrosion	2	2	2
17	Manchettes de cannes chauffantes	Fatigue corrosion	2		2
18	Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion	Fatigue thermique		2	3
19	Zones où arrive un fluide de température différente	Fatigue thermique	2		2
20	Piquages	Fatigue mécanique	2	3	3
21	Piquage inox	Fatigue thermique	2		2
22	Piquages inox	CSC	1		1
23	Piquages (tout ce qui est en 16MND5)	Vieillessement thermique	2	2	2
24		Fatigue à grand nombre de cycles	2	3	3
25	Goujons (suite à fuite d'acide borique)	CSC	2	1	1
26	Goujons	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	3	1	2
27	Goujons	Relaxation précontrainte	1	1	1
28	Boulons, joints, filetages	Matage	1	1	1
29	Boulons	Relaxation précontrainte	1		1
30	Buse d'aspersion	Erosion	1	1	1
31	Trou d'homme	Grippage	1	1	1
32	LEP	Fatigue corrosion	2		3
33	Zone sans pente de la LEP	Stratification	2	3	3

**Pertinence :**

1 faible

2 moyenne

3 importante

**Gravité :**

1 négligeable

2 grave

3 très grave

**Criticité :**

1 faible

2 moyenne

3 importante



### 3. Evaluation de la maintenance et identification des parades potentielles pour quelques triplets critiques identifiés

Trois triplets ont été choisis pour l'identification des parades potentielles. Ce choix a été fait par les experts en désignant ceux qu'ils estimaient originaux par rapports aux triplets connus et traités avant l'application (suite aux études OMF ou à un problème avéré par retour d'expérience, par exemple) :

**Triplet 1** : Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion / Fatigue thermique / Fissuration (voir ligne 18 du tableau 7.3)

**Triplet 2** : Piquage branche chaude / Fatigue à grand nombre de cycles / Faïençage (voir ligne 24 du tableau 7.3)

**Triplet 3** : Piquages (en acier 16 MND5) / Vieillissement thermique / Perte de caractéristiques des matériaux (voir ligne 23 du tableau 7.3)

Le triplet 3 est de criticité « moyenne », mais il a été aussi jugé intéressant et original par les experts. Pour chaque triplet nous donnons ci-dessous les résultats de l'élicitation.

### 3.1 Triplet 1 : Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion / Fatigue thermique / Fissuration

#### - Identification des effets possibles du vieillissement

- 1- Identification des conséquences : Fuite, rupture
- 2- Apparition d'éventuels nouveaux mécanismes : Corrosion

#### - Evaluation de la maintenance actuelle

- 1- Présentation des CND (Contrôles Non Destructifs) pour ce triplet critique (voir tableau 4 ci-dessous)

**Tableau 4 : Les CND pour le triplet 1.**

Soudure manchettes thermiques d'expansion FESSENHEIM, BUGÉY, CP1 à CP5 À partir de CP6	Gammagraphie double paroi	A chaque VC et 2 entre VC
	Ultrasons	
Soudure manchettes thermiques d'aspersion FESSENHEIM, BUGÉY, CP1 à CP4 À partir de CP5	Gammagraphie double paroi	A chaque VC et 2 entre VC

#### 2- Evaluation de la surveillance de ces triplets critiques

- La gammagraphie seule n'est pas suffisante, il est nécessaire de pouvoir procéder aussi à des contrôles ultrasons à des fins de confirmation. La gammagraphie seule n'est pas suffisante, il est nécessaire de pouvoir procéder aussi à des contrôles ultrasons pour détecter les défauts et les éventuelles fissures de fatigue.
- La détection est considérée facile.(probabilité de détection = 1)
- Les contrôles gammagraphiques sont perturbés par des pièges à contamination. Il est donc nécessaire de décontaminer, dès que la tranche dépasse les 15 années d'exploitation.
- Les contrôles sont effectués tous les 5 ans.

#### - Identification des éventuelles améliorations permettant

##### 1- d'assurer une surveillance plus efficace des zones concernées

- Il faudrait pour une surveillance efficace généraliser les contrôles ultrasons aux manchettes thermiques d'aspersion : il se pose alors le problème technique de faisabilité à étudier.
- Cette méthode de contrôle suppose aussi des mesures de maintenance préventives : décontamination au niveau des manchettes thermique d'expansion.

##### 2- d'éviter ou de ralentir l'apparition des mécanismes identifiés

- Changement des paramètres d'exploitation : réduire les écarts de températures, éviter les phases de démarrage – arrêt

- A noter : une évolution réglementaire, pour les manchettes d'aspersion ; les contrôles gammagraphiques ne sont pas efficaces

### 3.2 Triplet 2 : Piquage branche chaude / Fatigue à grand nombre de cycles / Faïençage

#### - Identification des effets possibles du vieillissement

- 1- Identification des conséquences : Fuite, rupture
- 2- Couplage possible entre mécanismes : Fatigue thermique / Fissuration

#### - Evaluation de la maintenance actuelle

- 1- Présentation des CND (Contrôles Non Destructifs) pour ces triplets critiques
- Pas de contrôles existants
  - 2- Evaluation de la surveillance de ces triplets critiques
  - Surveillance non existante et donc non efficace.

#### - Identification des éventuelles améliorations permettant

- 1- d'assurer une surveillance plus efficace des zones concernées
  - 2- d'éviter ou de ralentir l'apparition des mécanismes identifiés
- Des moyens de contrôle (par ultrason à l'extérieur) et de réparation (pour l'élimination du faïençage) sont en cours de développement.

### 3.3 Triplet 3 : Piquages (en acier 16 MND5) / Vieillissement thermique / Perte de caractéristiques des matériaux

#### - Identification des effets possibles du vieillissement

- 1- Identification des conséquences
- Déchirure ductile (en cas de défauts de fabrication (sous revêtement) ou de fissures de fatigue)
  - Rupture brutale (en cas de défauts ou de fissures de fatigue)
- 2- Apparition d'éventuels nouveaux mécanismes : aucun

#### - Evaluation de la maintenance actuelle

- 1- Présentation des CND (Contrôles Non Destructifs) pour ce triplet critique (voir tableau 5 ci-dessous)

**Tableau 5 : Les CND pour le triplet 3.**

Soudure dôme/tubulure d'aspersion	Gammagraphie simple paroi	A chaque VC
Soudure fond/tubulure d'expansion	Gammagraphie simple paroi	A chaque VC

- 2- Evaluation de la surveillance de ces triplets critiques
- Il faut aussi refaire le calcul des défauts critique à 60 ans (et non plus à 40 ans)

#### - Identification des éventuelles améliorations permettant

- 1- d'assurer une surveillance plus efficace des zones concernées

- Si le défaut calculé est critique par rapport au défaut de fabrication, on procède à des contrôles par ultrason, si c'est possible : problèmes liés à la géométrie, à l'accès.
- Des actions de R&D sont en cours pour la détection des petits défauts.
  - 2- d'éviter ou de ralentir l'apparition des mécanismes identifiés
- Changement des paramètres d'exploitation : réduire les sollicitations en réchauffant l'eau, lors des phases d'arrêt (le risque est les températures basses inférieures à la NDT et pouvant donc conduire à la rupture fragile).

## Annexe 6 : Liste EDF de mécanismes de dégradation et de modes de ruine



## Annexe 6 : Liste EDF de mécanismes de dégradation et de modes de ruine [Boudot, 2003]

**Les mécanismes de dégradation sont numérotés et les modes de ruines sont représentés en gras et soulignés.**

1. Alkali-réaction
2. Corrosion atmosphérique
3. Corrosion érosion
4. Corrosion inter-cristalline
5. Corrosion par frottement
6. Corrosion par l'acide borique concentré
7. Corrosion par piqûres
8. Corrosion sous contraintes (assistée par l'irradiation, en milieux REP nominaux, en milieu REP pollué, en milieu primaire, en milieu secondaire)
9. Corrosion sous la ligne d'eau
10. Corrosion des tuyauteries à âme acier

### **Déchirure ductile**

#### **Déformation excessive**

11. Erosion
12. Erosion par cavitation
13. Fatigue mécanique
14. Fatigue corrosion
15. Fatigue thermique
16. Fatigue vibratoire

### **Flambage**

17. Fluage d'irradiation
18. Fragilisation sous irradiation
19. Gonflement
20. Hydrolyse

### **Instabilité plastique**

21. Relaxation de la précontrainte
22. Retrait

### **Rupture brutale**

23. Tassement
24. Taux de bouchage
25. Usure
26. Vieillessement (des élastomères, des polymères, du néoprène)
27. Vieillessement thermique



## Annexe 7 : Liste EPRI de mécanismes de dégradation



## **Annexe 7 : Liste EPRI des mécanismes de dégradation**

Les mécanismes de dégradation sont groupés selon les modes qu'ils provoquent ; ces modes sont représentés en gras et soulignés et les mécanismes de dégradation sont numérotés.

### **Loss of material**

1. General corrosion
2. Selective Leaching (leaching = filtration, lessivage)
3. Galvanic corrosion
4. Crevice corrosion (crevice = fissure)
5. Pitting corrosion
6. Flow-accelerated corrosion
7. Erosion
8. Cavitation-erosion
9. MIC : Microbiologically influenced corrosion
10. Wear
11. Fretting (usure, rongement)
12. Macro-organisms (external surfaces)

### **Cracking**

13. Hydrogen damage
14. Stress Corrosion Cracking
15. Intergranular attack
16. Mechanical Fatigue
17. Thermal Fatigue
18. Vibration

### **Reduction of Fracture Toughness**

19. Thermal aging
20. Radiation embrittlement
21. Hydrogen embrittlement

### **Distorsion**

### **Biofouling**

### **Loss of Mechanical Closure Integrity : Stress relaxation**

### **Galvanised Steel Coating**



Annexe 8 : Liste ISO/CD 14224 de  
mécanismes de dégradation et de modes de  
défaillance



## Annexe 8 : Liste ISO/CD 14224 de mécanismes de dégradation et de modes de défaillance

Les modes de défaillance sont soulignés et les mécanismes de dégradation sont numérotés. Ces modes et ces mécanismes sont regroupés par type de défaillance.

### *Mechanical failure*

#### Leakage

1. Vibration
2. Clearance/alignment failure
3. Deformation

#### Looseness/disconnection

#### Sticking

### *Material failure*

4. Cavitation
5. Corrosion
6. Erosion
7. Wear

#### Breakage/fracture/crack

8. Fatigue

#### Overheating/burning

#### Burst/blown/exploded/imploded

### *External influence*

#### Blockage/plugged

#### Contamination

### *Instrument failure*

9. Control failure
10. No signal
11. Faulty signal
12. Out of adjustment
13. Software failure
14. Common mode failure

### *Electric failure*

15. Short circuiting
16. Open circuit
17. No power/voltage
18. Faulty power/voltage
19. Earth isolation fault



## Annexe 9 : Résultats de l'expertise pour l'évaluation de la pertinence



## Annexe 9 : Résultats de l'expertise pour l'évaluation de la pertinence.

Résultats de l'expertise pour l'évaluation de la pertinence des couples Zone/mécanisme de dégradation dans le cadre de l'application de la démarche d'anticipation au pressuriseur et à sa ligne d'expansion pour 60 ans d'exploitation.

N° Couple	Zone	Mécanisme de dégradation	Probabilité d'amorçage à 60 ans				Cinétique				Pertinence				Moyenne
			E 1	E 2	E 3	E 4	E 1	E 2	E 3	E 4	E 1	E 2	E 3	E 4	
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	2	1	2	1	3	2	2	2	3	1	2	1	
2	Ensemble de l'enveloppe externe	Fatigue mécanique	1	1	3	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
3	Ensemble de l'enveloppe externe	Vieillessement thermique	1	2	3	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2
4	Ensemble de l'enveloppe externe décalorifugée	Corrosion Atmosphérique	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
5	Enveloppe interne (Mécanisme actif dans les phases d'arrêt)	Corrosion par piqûres	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1
6	Enveloppe interne (revêtement inox)	Usure par corps migrants	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1
7	Enveloppe interne (surtout à l'interface liquide-vapeur)	Fatigue à grand nombre de cycles	3	2		1	2	1	1	1	3	1	1	1	2
8	Enveloppe interne (zone de variation de l'interface liquide - vapeur)	Corrosion due à milieu bi-phasique	1	1	2	1		1	1	2	2	2	1	1	1
9	16MND5 (si percement préalable du revêtement)	CSC	3	1	1	1	3	1	2	2	3	1	1	1	2
10	16MND5 (si percement préalable du revêtement)	Fragilisation sous H2	2	1	1	1	3	1	2	1	3	1	1	1	2
11	Ensemble des zones en inox écroui dont dureté HV > 300	CSC	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
12	Ensemble des zones en inox (Mécanisme actif dans les phases d'arrêt.)	Corrosion inter-cristalline	1	2	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
13	Zone entre manchettes et cannes chauffantes	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	3		1	1	3			1	3		1	1	2
14	Zone entre cannes chauffantes et plaques de maintien	Corrosion caverneuse (en zones confinées)	3		1	1	3		2	1	3		1	1	
15	LBM	Corrosion Atmosphérique	1	3	3	2	1	2	1	2	1	3	2	2	2
16	Manchettes thermiques	Fatigue corrosion	3	1	3	1	3	1	2	2	3	1	3	1	2
17	Manchettes de cannes chauffantes	Fatigue corrosion	3	1	3	1	3	1	2	2	3	1	3	1	2
18	Manchettes thermiques d'aspersion et d'expansion	Fatigue thermique	1	3	3	2	3	2			2	3	3	2	3
19	Zones où arrive un fluide de température différente	Fatigue thermique	1	2	3	1	3	2	2	2	2	2	3	1	2
20	Piquages	Fatigue mécanique	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1	3	1	2

21	Piquage inox	Fatigue thermique	2		3	2	2		1	2	2		2	2	
22	Piquages inox	CSC	1		2	1	2		2	2	1		2	1	1
23	Piquages (tout ce qui est en 16MND5)	Vieillessement thermique	1	2	3	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2
24	Piquage branche chaude	Fatigue à grand nombre de cycles	3	2		1	3	2		2	3	2		1	2
25	Goujons (suite à fuite d'acide borique)	CSC	2	2	2	1	3	2	2	1	3	2	2	1	2
26	Goujons	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	2	2	2	1	3	2	3	1	3	2	3	1	3
27	Goujons	Relaxation précontrainte		2	1	1		1		1		1	1	1	1
38	Boulons, joints, filetages	Matage		2		1		1				1		1	1
29	Boulons	Relaxation précontrainte			1	1			1				1	1	1
30	Buse d'aspersion	Erosion	2	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1
31	Trou d'homme	Grippage	2	1		1	2	1		1	2	1		1	1
32	LEP	Fatigue corrosion	3	1	2	2	2	1	2	2	3	1	2	2	2
33	Zone sans pente de la LEP	Stratification	3	2		1	2	2		1	3	2		1	2

E1 : expert 1,

E2 : expert 2,

E3 : Expert 3,

E4 : Expert 4.

**Probabilité d'amorçage :**

1 faible

2 moyenne

3 importante

**Cinétique :**

1 lente

2 moyenne

3 rapide

**Pertinence :**

1 faible

2 moyenne

3 importante



Annexe 10 : Résultats de l'expertise pour  
l'évaluation de la gravité



## Annexe 10 : Résultats de l'expertise pour l'évaluation de la gravité

Résultats de l'expertise pour l'évaluation de la gravité des couples Zone/mécanisme de dégradation dans le cadre de l'application de la démarche d'anticipation au pressuriseur et à sa ligne d'expansion pour 60 ans d'exploitation.

N° Zone	Zone	Mécanisme de dégradation	Sûreté					Disponibilité					Coûts					Dosimétrie					Image					Gravité	
			E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5	F1	F2	F3	F4	F5	E1	E2	E3	E4	E5		
1	Ensemble de l'enveloppe externe	Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	2	3	3	2	3	1	2	3	2	3	2	2	2	3	2	1	2	3	1	2	1	1	1	2	1	1	2
		Fatigue mécanique	2	3	3	3	3	1	2	3	3	3	2	2	3	3	2	1	2	3	3	1	2	2	3	3			
		Vieillessement thermique	3	3	3	1	3	3	2	3	1	3	2	2	3	3	2	1	3	3	3	1	2	3	1	3			
		Corrosion Atmosphérique	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	2	2	3	3	2	1	2	3	3	1	2	1	1	2			
2	Enveloppe interne	Corrosion par piqûres	3	3	1	2	2	3	2	2	2	2	3	2	2	3	3	3	1	3	2	3	2	1	1	3			
		Usure par corps migrants	3	3	1	2	2	3	2	1	2	2	3	2	1	3	3	3	1	2	2	3	2	1	1	2			
		Fatigue à grand nombre de cycles	3	3	3	3	2	3	2	3	3	2	3	2	3	3	3	3	1	3	2	3	2	3	3	3			
		Corrosion due à milieu bi-phasique	3	3	2	2	2	3	2	3	2	2	3	2	3	3	3	3	1	3	2	3	2	2	1	3			
3	16MND5	CSC	3	3	3	3	2	2	3	3	3	2	3	3	1	3	3	1	3	1	2	3	1	3	3				
		Fragilisation sous H2	3	3	3	2	2	2	3	1	3	2	3	3	1	3	3	1	3	1	2	3	1	3	3				
4	Ensemble des zones en inox	CSC	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	1	3	2	2	1	3	1	2	2	2	2			
		Corrosion inter-cristalline	2	2	1	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	1	3	2	2	1	3	1	2	2	2	2			
5	Zone entre manchettes et cannes chauffantes	Corrosion cavernueuse (en zones confinées)	2	2	2	2	1	3	1	2	2	1	3	1	2	1	3	1	2	1	1	1	2	1	1				
6	Zone entre cannes chauffantes et plaques de maintien	Corrosion cavernueuse (en zones confinées)	2	2	1	2	1	3	1	1	1	3	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1				
7	LBM	Corrosion Atmosphérique	2	2	2	2	1	3	2	2	2	1	3	2	2	1	3	2	2	1	3	1	1	2	1	2			
8	Manchettes thermiques Manchettes de cannes chauffantes	Fatigue corrosion	2	2	1	2	3	1	2	3	2	3	1	2	1	3	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2		
		Fatigue thermique																											
9	Piquages	Fatigue mécanique	3	2	3	3	3	3	3	2	3	1	3	2	3	1	3	2	3	1	3	2	1	3	2	1	3		
		Fatigue thermique																											
		CSC																											
		Vieillessement thermique	3	2	3	1	3	1	3	1	2	3	1	3	2	3	1	3	2	3	1	3	2	1	3	1	1	2	
11	Goujons	Fatigue à grand nombre de cycles	3	2	3	3	3	1	3	2	2	3	1	3	2	3	1	3	2	3	1	3	2	1	3	1	1	3	
		CSC	1	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1	1			
		Corrosion due à une fuite d'acide borique concentré	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1	1			

		Relaxation précontrainte	1	2	1	1		2	1	1	1		2	1	1		3	1	1		1	1	1	1	1	<b>1</b>	
12	Boulons, joints, filetages	Matage	1	2	1	1		2	1	1	1		2	1	1		3	1			1	1	1	1	1	<b>1</b>	
		Relaxation précontrainte																									
13	Buse d'aspersion	Erosion	3	1	1	1		3	1	1	1		3	1	1		3	1			1	1	1	1		<b>1</b>	
15	Trou d'homme	Grippage	1	1	1	1		2	1	1	1		2	1	1		3	1			1	1	1	1	1	<b>1</b>	
16	LEP	Fatigue corrosion	3	3	3	2		3	2	2	3	3	3	2	2		3	3	1	3	2	3	2	3	2	1	<b>3</b>
		Stratification	3	3	3	1		3	2	2	1	3	3	2	2		3	3	1	3	2	3	2	3	1	1	<b>3</b>

E1 : expert 1, E2 : expert 2, E3 : Expert 3, E4 : Expert 4, E5 : Expert 5.

### Gravité

1 : faible

2 : moyenne

3 : importante.

---

## Publications et communications

---

### Congrès internationaux avec comité de lecture

**L. BOUZAÏENE, P. HAĪK, F. PERES**, *Stimulation croisée d'expertise de maintenance : application au parc nucléaire français*, Actes des conférences ESREL 2002, Lambda Mu 13, Lyon, 19-21 mars, 2002.

**L. BOUZAÏENE, F. BILLY, J-C. BOCQUET, P. HAĪK, A. LANNOY, F. PERES**, *State of the art on expert Judgement methodologies and their application to failure anticipation*, Actes du 23ème Séminaire ESReDA "Decision analysis : methodology and applications for safety of transportations and process industries", Delft, pays-Bas, 18-19 novembre, 2002.

**L. BOUZAÏENE, F. BILLY, J-C. BOCQUET, P. HAĪK, A. LANNOY, F. PERES**, *Expert judgement methodology for failure anticipation in nuclear power plants*, Actes de la conférence ESREL 2003, pays-Bas, Maastricht, 15-18 juin, 2003.

**L. BOUZAÏENE, F. BILLY, J-C. BOCQUET, P. HAĪK, A. LANNOY, F. PERES**, *Anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement, par analyse du retour d'expérience et par expertise*, Actes du congrès Lambda Mu 14 « risques et opportunités », Bourges, 12-14 octobre, 2004.

**L. BOUZAÏENE, F. BILLY, J-C. BOCQUET, P. HAĪK, A. LANNOY, F. PERES**, *Méthodes et outils pour une approche d'anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement d'un système ou d'un composant*. Actes du congrès Qualita 2005, Bordeaux, 16-18 mars, 2005.

### Communications

- Présentation des travaux de thèse dans le cadre d'un groupe de travail animé par Christiane Coccozza et Michel Roussignol au Laboratoire d'Analyse et de Mathématiques Appliquées (UMR 8050 CNRS), Université de Marne la Vallée, 21 novembre 2003.
- Présentation des travaux de thèse dans le cadre des journées de travail GRP, Groupement de Recherche en Productique, dans le groupe de travail Automatisation et systèmes sûrs de fonctionnement, Tarbes, 24-25 octobre, 2003.
- Participation à un groupe de travail ESReDA, European Safety and Reliability Data Association, sur le vieillissement animé par Lars Pettersson (Swed Power, Suède), contribution par un chapitre à un ouvrage collectif intitulé : "Ageing of Components and Systems", en cours.



---

## Bibliographie

---

*A*

[Amblard et Prat, 1998] M-N. AMBLARD et J. PRAT, *Pressuriseur : dossier technique à thème*, Document interne confidentiel EDF- SFP, juin 1998.

*B*

[Ballay, 1997] J-F. BALLAY. *Capitaliser et transmettre les savoir-faire de l'entreprise*. Eyrolles. 1997.

[Ballay, 1999a] J-F. BALLAY. Le rôle de l'information et des hommes dans la gestion des connaissances. *Gestion des documents et gestion des connaissances*. Hermès science-publications. Vol. 3, n°3-4, pp.301-320. 1999.

[Ballay, 1999b] J-F. BALLAY. *Les processus clés de la gestion des savoirs*. L'expansion Management Review, pp. 111-119, décembre, 1999.

[Ballay, 1999c] J-F. BALLAY. *Capitaliser et transmettre les savoir-faire de l'entreprise*. Eyrolles éditions, Paris, 1999.

[Barbet et al, 1980] J-F. BARBET, M. LLORY et A. VILLEMEUR, *Application de l'analyse des modes de défaillances et leurs effets aux systèmes de centrales nucléaires*. Congrès sur la Fiabilité et la Maintenabilité, Perros-Guirec, 1980.

[Barthes, 1997] J-P. BARTHES. *Capitalisation des connaissances et intelligence artificielle*, Les journées franco-finlandaises de Tampere, Compiègne, 1997.

[Barthes, 1998] J-P. BARTHES. *Can knowledge management be reduced to document management*, 1998.

[BayesiaLab] : [www.bayesia.com](http://www.bayesia.com)

[Bounfour, 1999] A. BOUNFOUR. *Capital immatériel, performance et document*. *Gestion des documents et gestion des connaissances*. Hermès science-publications. Vol. 3, n°3-4, pp.321-336. 1999.

[Billy, 1999] F. BILLY, *Maintenance exceptionnelle - éléments pour établir un guide méthodologique d'interrogation d'experts*, document interne EDF, 1999.

[Billy et al., 2003] F. BILLY, M. GROSGEORGE, T.H. CHAU, P.BEAL et P.HAÏK, *Projet "durabilité REP"-Dossier local pressuriseur- Note de cadrage confidentielle*, EDF, juillet 2003.

[Bouchard et al, 2004] G. BOUCHARD, G. CELEUX, F. BILLY et F. JOSSE, *Réactualisation bayésienne d'un modèle de dégradation en fonction du retour d'expérience*, Actes du congrès Lambda Mu 14, Bourges, 12-14 octobre, 2004.

[Boudot, 2003] **R. BOUDOT**, *Projet Maîtrise du vieillissement*, Document EDF, communication personnelle, 30 mai 2003.

[Bussolini, 1971] **J.J. BUSSOLINI**, *High Reliability Design Techniques Applied to the Lunar Module*, Lecture Series N° 47 on Reliability on Avionics Systems. A.G.A.R.D. Rome, 16-17 septembre, 1971, Londres, 20-21 septembre, 1971.



---

[Cantzler, 1996] **O. CANTZLER**, *Une architecture conceptuelle pour la pérennisation d'historiques globaux de conception de produits industriels complexes*. Mémoire de thèse, Ecole Centrale Paris, Laboratoire productique logistique, Paris, 1996.

[Carey, 2001] **J. CAREY**, *Non-Class 1 Mechanical Implementation Guide Line and Mechanical tools*, Document confidentiel EPRI, novembre, 2001.

[Caussanel et Chouraqui, 1999] **J. CAUSSANEL et E. CHOURAQUI**. *Informations et connaissances : quelles implications pour les projets de capitalisation de connaissances*. Gestion des documents et gestion des connaissances. Hermès science-publications. Vol. 3, n°3-4, pp.101-119, 1999.

[Cavallucci et Lutz, 1998] **D. CAVALLUCCI et P. LUTZ**, *TRIZ une nouvelle approche de résolution des problèmes d'innovation*, International Journal of Innovation Research. N°1, Vol. 1., 1998.

[CEC, 2000] **CEC-ENV, contrat n°98/872/3040/DEB/C2**, *Safe management of NPP ageing in European Union*, rapport final Framatome, EDF, UNESA, Belgacom, IPSN, 29 septembre 2000.

[CEI, 1985] *Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes. Procédures d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)*. Publication 812 de la CEI, 1985.

[Cerisier et Weber, 2003] **L. CERISIER et P. WEBER**, *Modèle de type réseau bayésien pour l'estimation de la fiabilité des procédés*, Actes de la conférence Qualita 2003, 5<sup>ème</sup> congrès pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement, 2003.

[Clemen et Winkler, 1985] **R.B. CLEMEN et R.L. WINKLER**, *Limits in the precision and value of information from dependent sources*, Operations research, 33, 427-442, 1985.

[Cojazzi et al, 1996] **G. COJAZZI et al**, *Preliminary Requirements for a knowledge Engineering Approach to Expert Judgment Elicitation in Probabilistic safety Assessment*, actes de ESREL'96-PSAM III, International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 24-28 juin, Crète, 1996.

[Cojazzi et al, 1997] **G. COJAZZI et al**, *KEEJAM: A Knowledge Engineering Methodology for Expert Judgment Acquisition and Modelling in Probabilistic Safety Assessment*, actes de ESREL'97, International Conference on Safety and Reliability, 17-20 juin, Lisbonne, 1997.

[Cojazzi et al, 1998] **G. COJAZZI et al**, *KEEJAM: Expert Judgment Methodology : Application to the Prediction of the Results of a Fuel Coolant Interaction Experiment*, actes PSAM 4, International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 13-18 septembre, New York City, 1998.

[Cojazzi et Fogli, 2000] **G. COJAZZI et D. FOGLI**, *Benchmark Exercise on Expert Judgment Techniques in PSA Level 2*, Extended final report, European Commission, Joint Research Centre, EUR 19739 EN, 2000.

[Cooke et Goossens, 1996] **R.M. COOKE et L. J. H. GOOSSENS**, *Procedure Guide for the Use of Expert Judgement in uncertainty Analyses*, actes de ESREL'96-PSAM III, International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 24-28 juin, Crète, 1996.

[Cooke, 1991] R.M. COOKE, *Experts in uncertainty: opinion and subjective probability in science*, Oxford University Press, 1991.

[Cooke et Goossens, 2000] R.M. COOKE et L. J. H. GOOSSENS, *Procedure guide for structured expert judgement*, Project report, Nuclear Science and Technology, European Commission, 2000.

[Cordier, 1995] R. CORDIER, *Sélection des tâches de maintenance : concepts et définitions*, document interne EDF, 1995.

[Corset et al, 2003] F. CORSET, G. CELEUX et A. LANNOY, *Introduction du Retour d'Expérience dans les Réseaux Bayésiens*, Actes de la conférence Qualita 2003, 5<sup>ème</sup> congrès pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement, 2003.

[Corset, 2003] F. CORSET, *Aide à l'optimisation de maintenance à partir de réseaux bayésiens et fiabilité dans un contexte doublement censuré*, Mémoire de thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble, 22 janvier 2003.

---

## D

[Dagum et Horvitz, 1993] P. DAGUM et E. HORVITZ, *A Bayesian Analysis of Simulation Algorithms for Inference in Belief Networks*. Networks, vol. 23, p499-516, 1993.

[Degrange, 1993] M. DEGRANGE, *Pratique, théorie et technique de la créativité*, Publication scientifique et technique N°35, ENSAM Paris, 1993.

[Bordes, 2000] P. BORDES, *Doctrine de maintenance : Pressuriseur 900 MWe*, Document confidentiel EDF 2000.

[Dubreuil-Chambardel et al, 1998] A. DUBREUIL-CHAMBARDEL, A. LANNOY et F. PERCHET, *Optimiser la maintenance*, REE, Vol.8, P.55-61, septembre, 1998.

---

## E

[EPRI, 1993] *Common Aging Methodology*, Document EPRI, février 1993.

[Ermine, 1999] J-L. ERMINE. *Projet IC2 (Information, Communication, Commande), volume Capitalisation Des Connaissances, chapitre Capitaliser et partager les connaissances avec la méthode MKSM*, Hermès édition, Paris, 1999.

[Ermine, 2000] J-L. ERMINE. *La gestion des connaissances, un levier stratégique pour les entreprises*. IC'2000 - Actes de la conférence des journées francophones d'ingénierie des connaissances, Toulouse, 10-12 mai 2000.

[ESReDA, 2005] **European Safety and Reliability Data Association**, *Lifetime management of structures*, Editor A. Lannoy, DNV, Managing Risk, paragraphe rédigé par C. Degrave et A. Lannoy, voir notamment le chapitre 4, à paraître en 2005.

---

## F

[Faure et Bisson, 2000] A. FAURE et G. BISSON, *Gérer les retours d'expérience pour maintenir une mémoire métier, étude chez PSA Peugeot Citroën*. IC'2000 - Actes de la conférence des journées francophones d'ingénierie des connaissances, Toulouse, France, pp. 10-12, mai 2000.

[Fustier, 1991] M. FUSTIER *Pratique de la créativité*, ESF éditeur, 1976, (6<sup>ème</sup> édition 1991).

---

G

---

[Golay, 2000] M.W. GOLAY, *Improved nuclear power plant operations and safety through performance-based safety regulation*, Journal of Hazardous Materials, Vol.71, pp219-237, 2000.

[Grandemange et Meyzaud, 2001] J-M. GRANDEMANGE et Y. MEYZAUD, *Safe ageing management of nuclear power plants*, 21st ESReDA seminar “lifetime management”, Erlangen, 5-6 novembre 2001.

[Grundstein, 2000] M. GRUNDSTEIN. *Le management des connaissances de l'entreprise : problématique, axe de progrès, orientations*, 2000.

[Guarnieri et Haïk, 2002] F. GUARNIERI et P. HAÏK, *AFD, une nouvelle méthode pour l'identification et la maîtrise des défaillances : présentation, illustration et perspective*. Actes du colloque européen de sûreté de fonctionnement, ESREL 2002, Lambda Mu 13, Lyon, 19-21 mars, 2002.

---

H

---

[Huang et Darwiche, 1996] C. HUANG et A. DARWICHE, *Inference in belief networks : a procedural guide*. International Journal of approximate reasoning, vol. 15, p225-263, 1996.

[Hutin et Villemeur, 1995] J-P. HUTIN et A. VILLEMEUR, *L'optimisation de la maintenance par la fiabilité pour le parc nucléaire EDF*, RGN, N°6, novembre-décembre, 1995.

---

I

---

[IEEE, 1975] *IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Protection Systems* (An American National Standard) ANSI N41-4-1976, IEEE Std 352-1975 (Revision of IEEE Std 352-1972), 14 avril, 1975.

[ISO/CD 14224, 2003] ISO TC 67/SC N868, *Norme ISO/CD 14224 Rev 1, en projet, Petroleum, petrochemical and natural gas industries*, Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment, version du 6 décembre 2003.

[ISdF, 1995] ISdF- *Traitement des événements interdépendants – Réseaux bayésiens et sûreté de fonctionnement*, Projet ISdF 5/94, 1995.

---

J

---

[Jacquot et al, 1991] J-P. JACQUOT, P. LEGAUD et G. ZWINGELSTEIN, *Development of the RCM methodology for the EDF nuclear plants: a pilot application to the CVCS system*, IAEA, Technical Committee on RCM, Vienne, mai, 1991.

[Jacquot et al, 1994] J-P. JACQUOT, A. DUBREUIL-CHAMBARDEL, A. LANNOY et A. VILLEMEUR, *Optimiser la maintenance par la fiabilité*, Revue Epure, N°44, P. 23-31, octobre, 1994.

[Jaoui, 1994] H. JAOUI, *La créativité, mode d'emploi*, ESF éditeur, 1990 (2<sup>ème</sup> édition 1994).

[Jordan, 1999] M.I. JORDAN, *Learning in Graphical Models*. The MIT press, 1999.

[Jensen, 1990] F. V. JENSEN, K. G. OLESEN et S.K. ANDERSEN, *An Algebra of Bayesian Belief Universes for Knowledge-Based Systems, Networks*, vol. 20, p637-659, 1990.

---

*K*

---

[Kahn et Wiener, 1967] H. KAHN et A.J. WIENER, *The year 2000*, a framework for speculation, Macmillan, New York, 1967.

[Kaplan, 1999] S. KAPLAN, S. VISNEPOLSKI, B. ZLOTIN et A. ZUSMAN, *New Tools for Failure and Risk Analysis: Anticipatory Failure Determination (AFD) and the Theory of Scenario Structuring*, Ideation International Inc, 1999.

[Keeney et al, 1991] R.L. KEENEY et al, *Use of expert judgement in NUREG-1150*, Nuclear Engineering and Design, Vol. 126, pp. 313-331, North-Holland, 1991.

[King et Rudd, 1971] C.F. KING et D.F. RUDD, *Design and maintenance of economically failure-tolerant process*. Am. Inst. Chem. Engr. J., Vol. 18, P. 257-269, 1971.

[Kline et al, 1978] M.B. KLINE, R.L. MASTEN, J. DI PASQUALE et T.A. HAMILTON, *An analysis of the evaluation of the reliability and the maintainability disciplines*, Colloque international sur la fiabilité et la maintenabilité, Paris, 19-23 juin, 1978.

---

*L*

---

[Lannoy et Procaccia, 1994] A. LANNOY et H. PROCACCIA, *Méthodes avancées d'analyse des bases de données du retour d'expérience industriel*, Collection de la direction d'études et de recherche d'EDF, Eyrolles, 86, 1994.

[Lannoy et Procaccia, 2001] A. LANNOY et H. PROCACCIA, *L'utilisation du jugement d'experts en sûreté de fonctionnement*, Editions TEC & DOC, décembre, 2001.

[Lannoy et Chatelain, 2002] A. LANNOY et C. CHATELAIN, *One Application of the Bayesian Network Technique to the study of trends in Maintenance Costs*, Actes ESReDA, Rome, 2002.

[Lannoy et al, 2003] A. LANNOY, C. GARREAU et F-N. REMY, *Projet « Durabilité REP » - Intercomparaison entre les méthodes EPRI et EDF pour l'évaluation technico-économique de l'état d'une tranche REP*, rapport interne EDF R&D HT-50/03/003/B, septembre, 2003.

[Lannoy, 2004] A. LANNOY, *Introduction à la fiabilité des structures*, Techniques de l'Ingénieurs, traité de l'Entreprise industrielle, SE2070, avril, 2004.

[Lannoy et Procaccia, 2005] A. LANNOY et H. PROCACCIA, *Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel*, Editions Lavoisier TEC&DOC, à paraître en 2005.

[Lauritzen et Spiegelhalter, 1988] S. L. LAURITZEN et D. J. SPIEGELHALTER, *Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems*, Journal of the Royal Statistical Society, vol. 50, p.157-224, 1988.

[Lauritzen, 1996] S. L. LAURITZEN, *Graphical models*, Oxford Science Publications, 1996.

[Lees, 1980] F.P. LEES, *Loss Prevention in the Process Industries*. Butterworth, Publisher Ltd, 1980.

[Lievens, 1976] C. LIEVENS, *Sécurité des systèmes*, Capadues Editions, Toulouse, 1976.

[Longueville, 2003] **B. LONGUEVILLE**, *Capitalisation des processus de décision dans les projets d'innovation : application à l'automobile*, Mémoire de thèse, Ecole Centrale Paris, Laboratoire Génie Industriel, Paris, 2003.

---

*M*

---

[Mercier, 1992] **J-P. MERCIER**, *La Maintenance des Centrales Nucléaires*, Edition KIRK, COLLECTION INDUSTRIES, 1<sup>ère</sup> édition en 1987, seconde édition en 1992.

[Monchy, 1991] **F. MONCHY**, *La fonction maintenance : formation à la gestion de la maintenance industrielle*, Masson, février, 1<sup>ère</sup> édition en 1987, seconde édition en 1991.

---

*N*

---

[Netica] : [www.norsys.com](http://www.norsys.com)

[NF EN 13306, 2001] *Terminologie de la maintenance*, Norme européenne, juin, 2001.

[Nonaka et Takeuchi, 1995] **I. NONAKA et H. TAKEUCHI**, *The knowledge creating company*, Japon, 1995.

[NRC, 2004a] **Office of Nuclear Regulatory Research**, 1<sup>st</sup> Meeting of the Proactive Materials Degradation Assessment (PMDA) Expert Panel, Nuclear Regulatory Commission, août, 2004.

[NRC, 2004b] **Office of Nuclear Regulatory Research**, 2<sup>nd</sup> Meeting of the Proactive Materials Degradation Assessment (PMDA) Expert Panel, Nuclear Regulatory Commission, octobre, 2004.

---

*P*

---

[Pagès et Gondran, 1980] **A. PAGES et M. GONDRAN**, *Fiabilité des systèmes*, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. Editions Eyrolles, 1980.

[Peyrache, 1968] **G. PEYRACHE**, *Article sur la fiabilité*, Encyclopédie Universalis Paris, Vol.6, P. 1059, 1968.

[Polanyi, 1967] **M. POLANYI**, *The tacit dimension*, New York, 1967.

[PRA, 1982] **PRA procedures guide**, *A guide to the performance of probabilistic risk assessments for nuclear power plants*. NUREG/CR 2300, 1982.

[Pulkkinen et Holmberg, 1997] **U. PULKKINEN et J. HOLMBERG**, *A method for using expert judgement in PSA*. STUK-YTO-TR 129, 1997.

[Pulkkinen et al, 2004] **U. PULKKINEN, J. TERVO et K. SIMOLA**, *Stochastic Model for Lubricating Film Thickness in Rolling Contact*, 26<sup>ème</sup> séminaire ESReDA, Lifetime Management of Industrial Systems, Tampere, 11-12 mai, 2004.

---

*R*

---

[Reix, 1995] **R. REIX**, *Savoirs tacites et savoirs formalisés dans l'entreprise*, Revue française de gestion, Les sciences de gestion et les savoirs de l'entreprise : 17-28, septembre, 1995.



---

[Saby, 1997] P. SABY, *Description générique des modèles et de leurs défaillances, Rapport interne EDF et outil logiciel Geneviève*, décembre 1997.

[Signoret, 2002] J-P. SIGNORET et A. LEROY, *Le risque technologique*, Tutoriel du colloque européen de sûreté de fonctionnement, ESREL 2002, Lambda Mu 13, Lyon, 19-21 mars, 2002.

[Simola et Virolainen, 2000] K. SIMOLA, et R. VIROLAINEN, *The STUK/VTT Expert Judgement Methodology and its Use in the Phase 2. Benchmark Exercise in Expert Judgement Techniques in PSA Level 2 (BE-EJT)*, 205-208, 2000.

[Sliter et al, 2000] G. SLITER et al, *Life Cycle Management planning for important nuclear power plant systems, structures and components*, ICONE 8, Baltimore, 02-04 avril, 2000.

[Sliter et al, 2001] G. SLITER, F. GREGOR, D. LEHNERT et al, *Demonstration of life cycle management planning for systems, structures and components-- with pilot applications at Oconee and Prairie Island nuclear stations*, rapport interne EPRI 1000806 confidentiel, janvier, 2001.

[Sliter et Gregor, 2001] G. SLITER et F. GREGOR, *Life cycle management planning sourcebooks - Overview report*, rapport interne EPRI 1003058 confidentiel, décembre, 2001.

[Sliter, 2003] G. SLITER, *Life cycle management in the US nuclear power industry*, SMIRT 17, Prague, 17-22 août, 2003.



---

[Tassi et Legait, 1990] P.TASSI et S. LEGAIT, *Théorie des probabilités en vue des applications statistiques*, Editions TECHNIP, Paris, 1990.

[Thévenot, 1998] D. THEVENOT, *Le partage des connaissances, une mémoire interactive pour la compétitivité de l'entreprise*. Editions Lavoisier TEC&DOC, Paris, 1998.

[Thiébaud et al, 2001] F. THIEBAUD, R. DE GUIO et D. CAVALLUCCI, *Caractérisation et comparaison des méthodes de créativité*, 2<sup>ème</sup> Colloque international « conception et production intégrée », CPI'2001, 24-26 octobre, Fès, 2001.



---

[Vadcard, 1996] P. VADCARD, *Aide à la programmation de l'utilisation des outils en conception de produit*, Mémoire de thèse, ENSAM Paris, novembre 1996.

[Villemeur, 1988] A. VILLEMEUR, *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : Fiabilité – Facteur humain- Informatisation*, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. Editions Eyrolles, 1988.

---

*W*

---

[Weber, Suhner, 2002] P. WEBER et M-C. SUHNER, *Application des réseaux bayésiens à l'analyse des performances d'un processus*, Actes du colloque européen de sûreté de fonctionnement, ESREL 2002, Lambda Mu 13, Lyon, 19-21 mars, 2002.

[Weber et al, 2003] P. WEBER, A. MULLER, M-C. SUHNER et G. PERROUD, *Modélisation par réseaux bayésiens du processus de fiabilisation de produits, application à l'automobile*, Actes de la conférence Qualita 2003, 5<sup>ème</sup> congrès pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement, 2003.

[Whittaker, 1990] J. WHITTAKER, *Graphical Models in Applied Multivariate Statistics*. Wiley, 1990.

---

*Y*

---

[Yamada, 1977] K. YAMADA, *Reliability Activities at Toyota Motor Company*, Rep. Stat. Res., JUSE, Vol. 24, N°3, septembre, 1977.

[Yilzid et Golay, 2001] J. YILZID et M.W. GOLAY, *Development of expert system with bayesian networks for application in nuclear power plants*, EPRI International Maintenance Conference, Maintaining Reliable Electric Generation, août, 2001.

---

*Z*

---

[Zwingelstein, 1995] G. ZWINGELSTEIN, *Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels*, Hermès science-publications, 1995.



**Résumé :** Ce travail de thèse s'intéresse à l'anticipation du vieillissement des matériels (systèmes, structures ou composants) d'une installation dans le cadre de la gestion de son cycle de vie. La démarche proposée, intitulée **AVISE** pour **Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts**, permet l'identification des problèmes potentiels liés au vieillissement d'un matériel, de mesurer les risques pris en termes de probabilité d'apparition d'une dégradation ou de ses conséquences et de proposer des solutions adéquates pour freiner ou éviter ce vieillissement. La problématique de recherche a été formulée dans un contexte industriel particulier, le contexte du nucléaire. Ce dernier est caractérisé par des matériels spécifiques, particulièrement fiables et ayant donc un faible retour d'expérience. Pour compenser ce retour d'expérience faible, voire inexistant, deux solutions sont proposées dans la démarche. La première solution, qu'on peut considérer classique, consiste à avoir recours aux opinions d'experts. La seconde, plus originale, consiste à enrichir le retour d'expérience du matériel étudié par le retour d'expérience relevé sur des matériels dits « analogues ». Afin de mettre en œuvre ces solutions et de réaliser les objectifs de l'anticipation, un ensemble de supports méthodologiques a été conçu puis testé dans le cadre de l'application sur un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur. Le premier support est un processus générique d'interrogation d'experts identifié suite à une comparaison entre onze méthodes existantes utilisant le jugement d'experts. Deux méthodes de stimulation d'experts, intitulées **STIMEX-IMDP**, **STIMulation d'EXperts pour l'Identification de Mécanismes de Dégradation Potentiels**, et **STIMEX-IPP**, **STIMulation d'EXperts pour l'Identification de Parades Potentielles**, ont été élaborées en se fondant sur les concepts de l'aide à la créativité. Des listes de référence de mécanismes de dégradation et de modes ou effets du vieillissement ont été construites et utilisées dans le cadre de la méthode STIMEX-IMDP afin d'aider à la stimulation des experts et de favoriser l'exhaustivité des résultats. Ensuite, la démarche développée préconise et illustre l'utilisation des réseaux bayésiens pour la modélisation et la quantification des risques liés aux dégradations potentielles. Finalement, la construction d'un modèle conceptuel de données et l'identification des spécifications sont donnés pour la création d'une base de données de vieillissement. Les données à capitaliser ont été identifiées sur la base des travaux réalisés dans la thèse.

**Mots clés :** gestion de cycle de vie, anticipation, retour d'expérience, analyse de risque, mécanismes de dégradation, interrogation d'experts, stimulation d'experts, réseaux bayésiens, base de données de vieillissement.

**Abstract :** This thesis deals with components ageing anticipation in the context of life cycle management. The proposed approach, called AVISE, allows the identification of potential problems related to ageing, to measure the risks in terms of degradation probability and degradation consequences and gives the adequate solutions to stop or to postpone ageing. This research was undertaken in a particular industrial context, the nuclear industry. Equipments used in this context are specific and particularly reliable. These characteristics result in limited feedback (low number of failures). To compensate for this limited information, two solutions are proposed in this approach. The first solution that we can consider as a classical one consists in using expert judgement. The second one, more original, consists in using the operation feedback of "similar" components. In order to apply these solutions and to obtain the anticipation results, a set of methodological tools was developed and tested in a real industrial application on a nuclear power plant component: the pressuriser. The first tool is a generic process for expert judgement, identified thanks to a comparison between eleven existing methods using expert judgement. Two methods based on expert stimulation and called STIMEX-IMDP and STIMEX-IPP were elaborated. A reference list of degradation mechanisms and a reference list of ageing effects were constructed and used in the method STIMEX-IMDP in order to help expert stimulation. Then, the developed approach proposes the use of belief networks to model and quantify the risks related to the potential degradations. Finally, the construction of a conceptual data model and specifications are given for the creation of an ageing database. The data to capitalize was identified on the basis of the research undertaken in this thesis.

**Keywords :** Life Cycle Management, anticipation, operation feedback, risk analysis, degradation mechanisms, expert judgement, expert stimulation, belief networks, ageing data base.