

Modélisation et analyse technico-économique de la cavitation et de la fissuration d'une roue de turbine hydraulique

par

Thibaud LAMOTHE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 19 JUIN 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Thibaud Lamothe, 2018



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Antoine Tahan, ing, PhD, Directeur de Mémoire
Département de génie mécanique à l'École de Technologie Supérieure

M. Martin Gagnon, ing, PhD, Co-directeur
Exp. - Mécanique, métallurgie et hydroéolien à l'Institut de Recherche d'Hydro Québec (IREQ)

M. Jean-Pierre Kéné, Président du Jury
Département de génie mécanique à l'École de Technologie Supérieure

M. Amin Chaabane, membre du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de Technologie Supérieure

M. Michel Blain, Examineur Externe
Exp. - Robotique à l'Institut de Recherche d'Hydro Québec (IREQ)

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 28 MAI 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

De nombreuses personnes m'ont accompagné pendant ces deux années de maîtrise et je souhaite les remercier pour tout ce qu'ils m'ont apporté.

Tout d'abord, un grand merci à Antoine Tahan, professeur à l'ÉTS et directeur de mon projet de recherche. Toujours disponible et de bon conseil il a su m'éclairer et me guider quand j'en ai eu besoin.

Je souhaite également remercier Martin Gagnon, mon codirecteur, chercheur à l'IREQ, pour sa patience et toutes les explications qu'il m'a fournies dans le domaine de l'hydraulique.

Merci aux deux organismes MITACS et l'IREQ qui ont rendu ce projet réalisable grâce à leur financement et aux ateliers de formations qu'ils m'ont permis de suivre.

Merci également aux équipes de EDF R&D de m'avoir reçu à Chatou pour une formation en gestion d'actifs et tout spécialement à Jérôme Lonchamp, éditeur du logiciel VME, pour sa disponibilité et ses réponses toujours très rapides à mes interrogations.

Merci à l'IREQ, aux chercheurs avec qui j'ai eu l'occasion de travailler. Merci tout particulièrement au chercheur Michel Blain, avec qui nous avons passé d'innombrables heures de plaisir devant VME, à discuter de tout et de rien et à partager nos repas de Varennes jusqu'à Paris. Merci également aux stagiaires et collègues avec qui j'ai partagé mes pauses déjeuner et autres ballades digestives : Amélie, Anne, Bouchra, Cécile, Emmanuel et Laëtitia. Merci tout particulièrement à Olivier Blancke toujours enjoué et source inépuisable de bonnes informations qui m'a notamment permis de découvrir le groupe de squash de l'IREQ.

Un merci spécial à Quentin Chatenet, mon mentor et ami tout au long de ces deux années, pour ses bons conseils, astuces informatique ou bricolage, services rendus et bons moments partagés. Merci également à sa chérie Margaux.

VI

Merci aussi à mes colocataires et autres amis canadiens qui ont fait de ces deux années une expérience unique : Léonard, Louis, Vincent, Marie, Julien, Rémi, Olivier, Johan, Béatrice et Pierre.

Merci à mes cousins montréalais, Hector, Paul, Léo et Maeva Sanchez qui m'ont facilité l'installation, fait découvrir le Québec, et chez qui j'ai toujours passé d'excellentes soirées au cours de ces deux ans.

Enfin, merci à mes parents et à ma sœur qui même à des milliers de kilomètres ont toujours été présents, qui m'ont encouragé dans mes études et sans qui je ne serai jamais arrivé jusque là. Merci beaucoup.

MODÉLISATION ET ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DE LA CAVITATION ET DE LA FISSURATION D'UNE ROUE DE TURBINE HYDRAULIQUE

Thibaud LAMOTHE

RÉSUMÉ

En 2017, l'ordonnancement des turbines électriques du parc machine d'Hydro-Québec est essentiellement réalisé sur critère de rendement. On observe que les turbines les plus sollicitées se dégradent plus rapidement et tombent plus souvent en panne. En effet, le coût global du cycle de vie n'est pas pris en compte. Nous nous proposons donc de réaliser une étude technico-économique sur les roues des turbines et d'étudier les stratégies de maintenance. Dans le cadre de cette analyse des roues de turbines et suite à une étude préalable réalisée au sein d'Hydro-Québec, deux modes de dégradation sont identifiés : la cavitation et la fissuration.

Après une présentation de l'outil informatique utilisé pour réaliser l'analyse, les deux modes de dégradations sont définis dans deux chapitres distincts. L'outil choisi pour cette étude est VME, développé par les équipes d'EDF R&D avec qui l'IREQ entretient de multiples collaborations. Son interface graphique permet d'inclure à la fois des indicateurs physiques et financiers. C'est ensuite par simulation de Monte-Carlo que les résultats sont générés.

Pour la fissuration, dans un premier temps c'est la physique du phénomène, l'origine des bris puis son impact sur la fiabilité qui sont présentés. Les conséquences de la maintenance sur la durée de vie des roues sont ensuite mises en avant présentant un modèle simplifié. La plus importante partie s'attache à présenter la construction du modèle numérique : c'est cinq sous-modèles qui sont détaillés avant d'être assemblés en une version finale. Enfin ce premier chapitre se conclut par une étape de vérification permettant de confirmer que les résultats sont en phase avec ce qui était attendu.

Pour la cavitation, c'est une brève revue de littérature qui explicite la physique du phénomène. Une seconde partie décrit un modèle de cavitation basé sur des observations simples et fidèles à la pensée des experts consultés. Ce modèle simple permet de relier une physique encore mal appréhendée aux coûts engendrés par la cavitation. La dernière partie décrit comment intégrer le modèle proposé dans VME et propose des pistes d'évolutions pour tendre vers un modèle plus précis.

Mots-clés: Turbines hydrauliques, Maintenance (Stratégies de), Fissuration, Cavitation, Fiabilité, Gestion d'actifs, Valeur actuelle nette (VAN), Monte-Carlo (Simulation de), Probabilités conditionnelles, Cycle de vie, Scénarios, Réparation, Remplacement, Coûts, Bris, Dégradation, Défaillance, Optimisation, Aide à la décision, Inspections, Kaplan-Meyer

TECHNICO-ECONOMIC MODELLING OF MAINTENANCE COSTS FOR HYDROELECTRIC TURBINE RUNNERS

Thibaud LAMOTHE

ABSTRACT

In 2017, scheduling of Hydro-Quebec's hydroelectric turbines was essentially determined according to their profitability. Nevertheless, the turbines most solicited degrade more rapidly and breakdown more often. In fact, the global cost of the complete lifecycle is not taken into consideration. This is why we propose to complete a techno-economic analysis of the turbine runners and to study maintenance strategies. In the context of this analysis and following a preliminary study previously completed by Hydro-Québec, two main degradation factors are identified : crack propagation and cavitation.

Once the software tool used to complete the analysis has been presented, the two degradation factors are defined in two distinct chapters. The asset management tool chosen is VME, developed by EDF R&D teams, with whom IREQ often collaborates. Its graphical interface allows both technical and economic indicators to be included. Afterwards, the results are generated by a Monte-Carlo simulation.

For crack propagation, first the physics of the phenomenon, the origin of the breakage and its impact on reliability are presented. The consequences of maintenance on the lifespan of the turbine runners are then explained via a simplified model. The most important aspect lies in the presentation of the digital model : it is composed of five sub-models, which are defined in detail prior to assembling them into a final version. Finally, this first chapter concludes with a verification step to confirm that the results are aligned with those expected.

For cavitation, a brief literature review explains the physics of the phenomenon. A second part describes a cavitation model based on observations which are simple and true to the opinions of the experts consulted. This model allows physics still poorly understood to be linked to the costs created by cavitation. The last part describes how to integrate the proposed model in VME and introduces paths of evolution to reach a more precise model.

Keywords: Hydroelectric turbine runners, Maintenance, Crack propagation, Cavitation, Reliability, Asset management, Net Present Value, Monte-Carlo (Simulations), Bayesian statistics, Life cycle cost, Repair, Replacement, Costs, Break, Degradation, Optimization, Decision analysis, Inspections, Kaplan-Meier

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 LES OUTILS DE L'ANALYSE TECHNIQUE-ÉCONOMIQUE	3
1.1 Notions de gestion des actifs industriels et maintenance	3
1.1.1 Le coût de cycle de vie	4
1.1.2 La valeur actuelle nette	4
1.1.3 Les autres indicateurs classiques	6
1.1.4 Termes liés à la maintenance	7
1.2 Présentation et justification de VME	7
1.2.1 Les grands principes	8
1.2.2 Le modèle	9
1.2.2.1 Moyens de production	10
1.2.2.2 Événements	10
1.2.2.3 Parades	11
1.2.2.4 Ressources	12
1.2.2.5 Utilisation dérivée des blocs	13
1.2.2.6 Liens entre les blocs	14
1.2.3 Simulation de Monte-Carlo	15
CHAPITRE 2 MODÈLE DE FISSURATION	17
2.1 Revue de littérature	17
2.1.1 La fissuration : un phénomène physique	17
2.1.1.1 Les défauts : origine du bris	18
2.1.1.2 Les cycles HCF/LCF : raison du bris	18
2.1.1.3 Le diagramme de Kitagawa : état limite pour le bris en fissuration	19
2.1.1.4 Fiabilité : probabilité d'occurrence du bris	21
2.1.2 Stratégie actuelle de réparation	21
2.1.3 Le modèle de fiabilité	23
2.1.3.1 Notions de fiabilité appliquées à la roue	23
2.1.3.2 Un premier modèle simple, cœur de l'étude	26
2.1.4 Modélisation simplifiée	28
2.2 Entrée du modèle	29
2.2.1 Les données	29
2.2.2 Les scénarios à l'étude	31
2.2.2.1 Scénarios liés à la maintenance	31
2.2.2.2 Scénarios liés à la physique	32
2.2.2.3 Conclusion	32
2.2.3 La construction du modèle sous VME	33
2.2.3.1 Premier modèle : inspection et remplacement	33

2.2.3.2	Deuxième modèle : des cycles pour des durées aléatoires	37
2.2.3.3	Troisième modèle : des aubes en série	40
2.2.3.4	Quatrième modèle : séparation de la courbe de fiabilité	42
2.2.3.5	Cinquième modèle : insertion des conditions	47
2.2.3.6	Sixième modèle : roue de remplacement	51
2.2.3.7	Modèle complet	53
2.2.4	Vérification	56
2.2.4.1	Test de convergence de Monte-Carlo	57
2.2.4.2	Vérification de la quantité de bris	58
2.2.4.3	Vérification des courbes de défaillances	61
2.3	Conclusion	62
CHAPITRE 3 MODÈLE DE CAVITATION		65
3.1	Revue de littérature	65
3.1.1	Le phénomène de cavitation	65
3.1.1.1	Les conséquences de la cavitation	66
3.1.1.2	Éviter la cavitation	67
3.1.1.3	Les enjeux actuels	67
3.1.2	Les types de cavitation	68
3.1.2.1	Cavitation d'entrée	69
3.1.2.2	Cavitation de sortie	69
3.1.2.3	Torche	69
3.1.2.4	Cavitation de recirculation	70
3.1.2.5	Conclusion	71
3.1.3	Approche expérimentale	71
3.1.3.1	Essais avec le banc de cavitation vibratoire	71
3.1.3.2	Le CaviJet	72
3.1.3.3	Limite des résultats obtenus	72
3.2	Réalisation du modèle	73
3.2.1	Différences fondamentales avec la fissuration	73
3.2.2	Création d'un modèle simple de cavitation	74
3.2.3	La réalité technico-économique du modèle	77
3.2.3.1	Quantité de matière arrachée au cours du temps	77
3.2.3.2	Coût unitaire de la matière arrachée	78
3.2.3.3	Coût de réparation à l'instant t	80
3.2.3.4	Influence de la maintenance	81
3.2.4	Conception sous VME	82
3.2.4.1	Le comptage du temps avec VME	83
3.2.4.2	Introduction des variables aléatoires sous VME	84
3.2.4.3	Un premier modèle simple	85
3.2.4.4	Les limites de ce modèle	87

3.2.4.5	Impossibilité actuelle de combiner deux variables aléatoires	91
3.2.4.6	Analyse technico-économique et évaluation de VME	91
3.2.4.7	Vers une ouverture de la fonction de coût	92
3.2.4.8	Limites de VME : solution globale	97
3.3	Conclusion	101
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		103
BIBLIOGRAPHIE		106

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Informations générales	30
Tableau 2.2 Informations réparation	30
Tableau 2.3 Informations remplacement	30
Tableau 3.1 Paramètres de l'étude - Cavitation	86

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Valeur actuelle nette (Lonchamp, 2017) 5
Figure 1.2	Interactions entre les blocs dans VME..... 10
Figure 1.3	VME - Création d'une tranche 11
Figure 1.4	VME - Création d'un évènement 11
Figure 1.5	VME - Création d'une maintenance 12
Figure 1.6	VME - Création d'une ressource 13
Figure 1.7	Évolution d'un composant sous VME (Lonchamp, 2017) 14
Figure 1.8	Principe de fonctionnement de VME (Lonchamp, 2017) 15
Figure 2.1	Fissuration - Types de défauts (Gagnon <i>et al.</i> , 2013a) 18
Figure 2.2	Fissuration - Blocs de chargement (Gagnon <i>et al.</i> , 2013a) 19
Figure 2.3	Diagramme de Kitagawa (Kitagawa & Takashi, 1976) 20
Figure 2.4	Stratégie actuelle de maintenance des roues de turbines 22
Figure 2.5	Focalisation sur le modèle 24
Figure 2.6	Exemples de lois de dégradation 24
Figure 2.7	Probabilité conditionnelle de bris si bris puis remplacement systématique 27
Figure 2.8	Probabilité conditionnelle de bris si aucun bris 28
Figure 2.9	Modèle simple : Schéma 33
Figure 2.10	Modèle simple : Premier essai sous VME 34
Figure 2.11	Modèle simple : Occurrences, Réparation ABAO..... 35
Figure 2.12	Modèle simple : Occurrences, Réparation AGAN 35
Figure 2.13	Modèle simple : Flux financiers, sans MC..... 36

Figure 2.14	Modèle simple : Flux financiers, avec MC	37
Figure 2.15	Influence du temps sur la taille du bris.....	38
Figure 2.16	Schéma du modèle avec cycles.....	38
Figure 2.17	Modèle avec cycles : Cycles de réparation	39
Figure 2.18	Modèle avec cycles : Cycles de réparation et remplacement	40
Figure 2.19	Modèle avec cycles : Diverses occurrences.....	41
Figure 2.20	Modèle à deux aubes en séries sous VME.....	42
Figure 2.21	Modèle à treize aubes en séries sous VME	43
Figure 2.22	Probabilité de bris d'une aube au cours du temps	43
Figure 2.23	Décomposition de la probabilité de bris	44
Figure 2.24	Modèle avec décomposition de la fonction de bris sous VME	45
Figure 2.25	Loi de fissuration : Mort-Né.....	46
Figure 2.26	Loi de fissuration : Dégradation naturelle	46
Figure 2.27	Séparation fiabilité : Occurrences	47
Figure 2.28	Séparation fiabilité : Occurrences, fortes pentes	48
Figure 2.29	Ébauche du modèle de comptage sous VME	49
Figure 2.30	Modèle de comptage sous VME	50
Figure 2.31	Modèle avec comptage de jetons.....	51
Figure 2.32	Réparations et remplacement en fonction du nombre de jetons	52
Figure 2.33	Modèle de roue de remplacement sous VME	53
Figure 2.34	Cas avec roue en stock.....	53
Figure 2.35	Cas sans roue en stock	54
Figure 2.36	Rappel du modèle simple.....	54
Figure 2.37	Séparation des courbes & Cycles de réparation	55

Figure 2.38	Ajout du système de comptage	55
Figure 2.39	Ajout du système 'roue de remplacement'	55
Figure 2.40	Deux aubes en séries	56
Figure 2.41	Modèle de fissuration complet	57
Figure 2.42	Résultats du test de convergence	58
Figure 2.43	Une aube dégradée en permanence	59
Figure 2.44	Trois aubes dégradées en permanence	59
Figure 2.45	Vérification, quantité de bris - Global	60
Figure 2.46	Vérification, quantité de bris - Démarrage	60
Figure 2.47	Vérification, quantité de bris - Remplacement	60
Figure 3.1	Diagramme d'état de l'eau	66
Figure 3.2	Photo d'une aube érodée par cavitation	68
Figure 3.3	Modes principaux de cavitation rencontrés sur les turbines Francis : a) d'entrée, b) de sortie, c) en torche à débit partiel, d) en torche en surdébit	70
Figure 3.4	Schéma du banc d'essai de cavitation vibratoire	72
Figure 3.5	Schéma du CaviJet	73
Figure 3.6	Modèle simplifié de l'arrachement de matière	76
Figure 3.7	Incertitudes sur les paramètres du modèle simplifié de cavitation	76
Figure 3.8	Quantité de matière arrachée au cours du temps	77
Figure 3.9	Coût en fonction de la matière arrachée	79
Figure 3.10	Schéma bloc du calcul du coût lors d'une inspection	80
Figure 3.11	Cycle de réparation	81
Figure 3.12	Points stratégiques du modèle de cavitation	82

Figure 3.13	Évolution de la quantité de matière arrachée en fonction d'inspections	83
Figure 3.14	Exemple de conception d'un modèle simple sous VME	85
Figure 3.15	Exemples de graphes de sortie du modèle simple précédent	85
Figure 3.16	Modèle simple de cavitation sous VME	86
Figure 3.17	Résultats du modèle précédent	88
Figure 3.18	Calcul du coût, biais de la linéarité	89
Figure 3.19	Coût pour t_1 fixé	93
Figure 3.20	Prise en compte de la période post-réparation	96
Figure 3.21	Coût pour c_1 fixé	96
Figure 3.22	Utilisation de deux variables aléatoires dans le calcul des coûts	98
Figure 3.23	Modèle de comparaison de deux pentes	100
Figure 3.24	Modèle complet de cavitation	101

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ABAO	As Bad As Old
AGAN	As Good As New
CCV	Coût du cycle de vie
CF	Cash Flows
CV	Coefficient de valeur
EDF	Électricité de France
ETS	École de technologie supérieure
FORM	First Order Reliability Method
GERAD	Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions
HCF	High Cycle Fatigue
IPOP	Investments Portfolio Optimal Planning (logiciel EDF)
IREQ	Institut de Recherche en Électricité du Québec
LCF	Low Cycle Fatigue
MARS	Maintenance Assessment of Repairable Systems (logiciel EDF)
MC	Maintenance corrective
MP	Maintenance préventive
NOMAD	Nonlinear Optimization with the MADS Algorithm (logiciel GERAD)
PréDDIT	Prédiction de la Dégradation et Diagnostic Intégré des Turbines (Projet IREQ)
THAUR	Turbines hydrauliques adaptées à leur utilisation réelle (Projet IREQ)
TR	Temps de retour
TRI	Taux de rentabilité interne
VAN	Valeur actualisée nette
VME	Valorisation des stratégies de maintenance exceptionnelles (logiciel EDF)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

α	Taux d'actualisation
α_i	Coefficients polynomiaux
ρ	Masse volumique de l'eau liquide
ρ_v	Masse volumique de la vapeur d'eau
σ	Nombre de Thoma
β	Constante de calcul facteur
A	Constante de calcul
B	Constante de calcul
CF	Flux financiers
CF^*	Flux financiers actualisés
D_i	Durée entre deux inspections
F_a	fonction de répartition d'une aube (cumulative)
F_r	fonction de répartition d'une roue (cumulative)
I_i	Inspection
K	Facteur d'intensité de contrainte sur un cycle
N	Nombre de cycle en fatigue
P	Pression dans un fluide
$P(A)$	Probabilité de l'événement A
$Pr(t)$	Probabilité de bris de la roue à l'instant t
$Q_{mat}(t)$	Quantité de matière arrachée au cours du temps
R_a	Fonction de fiabilité d'une aube (cumulative)
R_r	Fonction de fiabilité d'une roue (cumulative)
X	Variable aléatoire

a	Paramètre de droite : coefficient directeur
b	Paramètre de droite : ordonnée à l'origine
c_1	Pente de la droite d'arrachement de matière
d_{t_i}	Nombre d'individus ayant connu un évènement à l'instant t_i
g	Constante de gravité
n	Nombre de simulations de Monte Carlo
n_{t_i}	Nombre d'individus qui auraient pu connaître l'évènement entre t_{i-1} et t_i
sr_i	Seuil à partir duquel la réparation est déclenchée lors de l'inspection suivante
t	Variable temporelle
t_1	Temps à partir duquel la matière est arrachée en cavitation
t_d	Temps où la dégradation est réalisée
t_m	Temps où la maintenance est effectuée
t_{sr_i}	Date d'occurrence du seuil sr_i
t_{I_i}	Date d'occurrence de l'inspection I
v	Vitesse d'un fluide
z	Hauteur d'eau
$\$ _i(t)$	Fonction de coût

INTRODUCTION

En 2017, Hydro-Québec réalise l'ordonnancement de ses turbines principalement sur critère de rendement. Cela permet de palier à moindre coût la demande des consommateurs en électricité. Cependant la fiabilité et la dégradation des matériels ne sont pas prises en compte. Et cela alors que les coûts liés à la maintenance et la non-production sont parfois importants. Ainsi, depuis quelques années, un certain intérêt est développé autour des notions de fiabilité et de l'utilisation optimale des turbines. Après le projet PréDDIT (Prédiction de la dégradation et diagnostic intégré des turbines), qui a permis d'établir des notions importantes de fiabilité, c'est aujourd'hui le projet THAUR (Turbines hydrauliques adaptées à leur utilisation réelle : 2017-2023) qui voit le jour.

À travers le projet THAUR et dans un contexte de gestion des actifs, l'IREQ (Institut de recherche en électricité du Québec) cherche à démontrer l'intérêt d'intégrer la valeur économique des stratégies de maintenance. Pour cela, il faut préciser les modes de défaillances principaux, savoir les modéliser correctement et y associer des procédures de réparation adaptées. En effet ces procédures engendrent des coûts et ont une influence sur la durée de vie des divers équipements. C'est pourquoi cette étude s'intéresse à l'analyse technico-économique des roues de turbines. Ce qui permettra ensuite d'analyser des stratégies de maintenance et d'en extraire les plus adaptées à la réalité. Cela se traduit par l'étude des modes de dégradation des aubes des turbines : les scénarios d'inspections, de réparations et de remplacements des roues.

Pour ce faire, c'est le logiciel VME (Valorisation des stratégies de maintenance exceptionnelle) développé par les équipes d'EDF R&D depuis les années 2000 qui sera utilisé. VME est un outil d'aide à la décision en fonction d'investissements. Il permet d'évaluer les stratégies de maintenances grâce à l'évaluation du cycle de vie des turbines et à des indicateurs économiques tels que la VAN (Valeur actuelle nette) ou le retour sur investissements. À l'aide d'outils pro-

babalistes, et de simulations de Monte-Carlo, il compare un scénario fictif à une stratégie de référence.

Ce projet s'inscrit ainsi dans une collaboration entre les deux entités EDF R&D et l'IREQ. En effet, VME est à l'origine un logiciel développé par EDF pour gérer la maintenance des tranches nucléaires. Notre objectif ici sera d'évaluer l'adaptabilité de VME au domaine de l'hydraulique et sa capacité à répondre à nos attentes. Au terme de la collaboration, un avis sera émis sur le logiciel et des recommandations à faire aux équipes d'EDF, leur fournissant un retour d'information précieux sur l'interface de l'outil. Les modèles bâtis jusque-là seront un indicatif de ce qui peut être fait et fourniront les premières valeurs économiques pertinentes.

D'après l'expérience acquise dans le projet PréDDIT à l'IREQ, deux modes principaux de dégradations ont été identifiés et seront étudiés séparément. La fissuration est un phénomène lié à la transformation d'un minuscule défaut en une profonde entaille. La fissure se propage à une vitesse similaire à celle du son dans le matériau. Ainsi à partir du moment où elle est détectée il est trop tard pour toute prévention. Les coûts engendrés et la difficulté de prédire ce type de dégradation en font un adversaire redoutable pour les exploitants de turbines. Le second mode de dégradation est érosif, linéaire et croissant, donc beaucoup plus facile à appréhender. Il s'agit de la cavitation qui prend ses origines dans le changement d'état de l'eau. Après un premier chapitre traitant des outils utilisés au cours de ce rapport, ces deux phénomènes feront l'objet de deux chapitres.

CHAPITRE 1

LES OUTILS DE L'ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Ce premier chapitre est destiné à présenter tout ce qui n'a pas trait à la physique des phénomènes de dégradation. C'est donc l'aspect monétaire de l'analyse technico-économique qui est introduit. La première partie présentera les concepts liés à la gestion d'actifs. L'objectif de ce mémoire étant à la fois de réaliser une analyse technico-économique et à la fois d'évaluer l'outil choisi pour réaliser cette analyse, la seconde partie introduira cet outil, à savoir le logiciel VME. Suivront alors les deux chapitres techniques sur la fissuration et la cavitation, modes de dégradation des turbines.

1.1 Notions de gestion des actifs industriels et maintenance

La gestion d'actif consiste à gérer des investissements en fonction de certaines règles et de contraintes. Le but est de tirer le meilleur rendement possible de ses capitaux en fonction du niveau de risque choisi. L'intérêt est porté aux investissements, mais également à la gestion du portefeuille au cours du temps. Dans le cas présent il s'agit d'assurer la fiabilité des turbines et minimiser les coûts à long terme : à la fois les coûts de production et les coûts de maintenance. Ce n'est donc pas uniquement la période d'exploitation qui est prise en compte, mais le coût de la turbine de sa fabrication à son recyclage ainsi que les coûts liés à son état de fonctionnement. Cette notion est appelée coût du cycle de vie. Une fois l'ensemble des coûts considérés, la prise de décision est plus aisée pour un gestionnaire. Pour cela, les décideurs ont également besoin de données pertinentes pour les aider à faire leur choix et répartir au plus juste l'argent dont ils disposent. Certains indicateurs classiques seront donc présentés, notamment la valeur actuelle nette, très utilisée dans VME. Enfin puisque la dégradation est au coeur de ce mémoire, un petit rappel sur quelques termes du champ lexical de la maintenance sera effectué.

1.1.1 Le coût de cycle de vie

Le coût de cycle de vie représente l'ensemble des coûts liés à un produit tout au long de sa durée de vie, allant de sa conception jusqu'à son recyclage. Tel que défini dans la Norme *NFEN60300 – 3 – 3* (Nor, 2005), il peut être évalué de la manière suivante :

$$CCV = C_c + C_i + C_e + C_o + C_p + C_m + C_a + C_{hs} + C_r \quad (1.1)$$

- C_c : coûts de conception.
- C_i : coûts d'installation et de mise en route.
- C_e : coûts énergétiques.
- C_o : frais d'exploitation (main-d'œuvre).
- C_p : frais de protection (assurances).
- C_m : coûts de maintenance et réparation.
- C_a : coûts d'arrêt de production.
- C_{hs} : coûts de mise hors service.
- C_r : coûts de recyclages.

1.1.2 La valeur actuelle nette

Il s'agit de l'indicateur principal utilisé dans le cadre des valorisations de stratégies de maintenances, comme expliqué par (Jones & Smith, 1982). Elle est définie comme étant la somme des flux financiers actualisés générés par un investissement et à l'aide de deux paramètres.

Le taux d'actualisation - noté α : il permet de comparer des flux monétaires à différentes dates en prenant en compte l'inflation. Il porte en général sur deux dimensions : l'aversion au risque (vision de la valeur de l'investissement en fonction du risque qu'il engendre) et la valeur temps de l'argent.

Les flux monétaires - notés *CF* (Cash Flows) : maintenance préventive, corrective, défaillance ou achat, à chaque évènement correspond un coût. Ces coûts sont actualisés grâce au taux

d'actualisation.

$$CF^*(t) = CF(t) \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (1.2)$$

À partir de là, la VAN :

$$VAN = \sum \frac{CF^*}{1 + \alpha} - I \quad (1.3)$$

Avec I l'investissement initial. Une VAN positive traduit alors un investissement rentable et donc une stratégie acceptable. Dans le cas présent, elle servira d'indice de comparaison entre deux stratégies :

$$VAN = CCV(\text{Strategie de Reference}) - CCV(\text{Strategie Evaluee}) \quad (1.4)$$

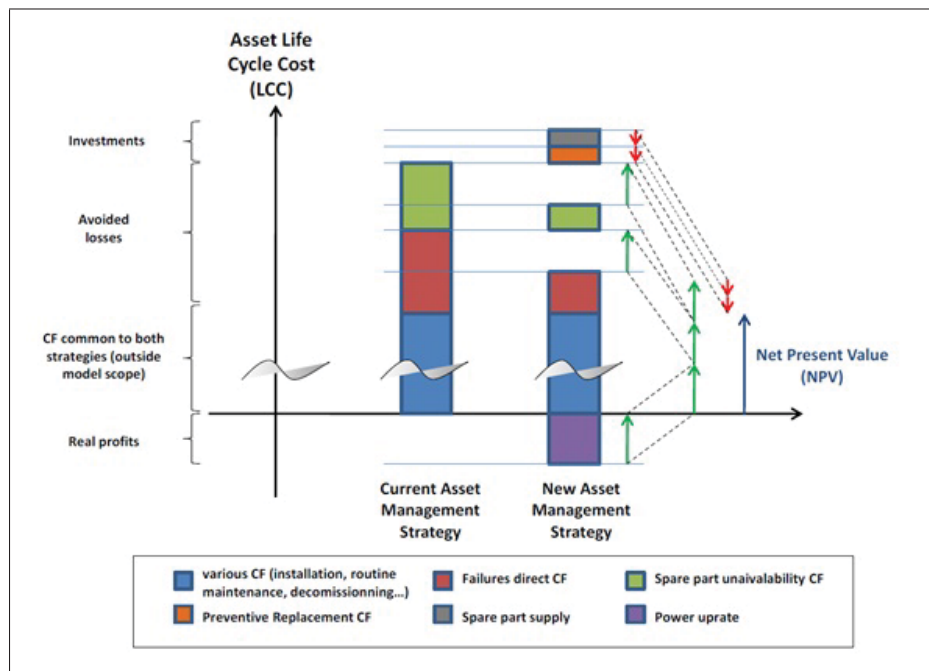


Figure 1.1 Valeur actuelle nette (Lonchamp, 2017)

Sur la figure 1.1, la VAN ne varie pas qu'avec les coûts d'investissements, mais aussi avec les gains de non-pertes de productions. Ainsi une stratégie où la maintenance est deux fois plus coûteuse, peut être rentable si les arrêts intempestifs et pertes de productions sont réduits. D'où l'intérêt de comparer les stratégies sur l'ensemble du cycle de vie des équipements.

Notions de probabilités

Les pannes sont des événements aléatoires : on dit que ce sont des événements stochastiques, par opposition aux événements déterministes dont on connaît les fréquences d'apparitions. Aux événements stochastiques sont associées des lois de probabilités. Il est important de noter qu'ici les composantes de la VAN ne sont pas toutes déterministes puisqu'elles vont dépendre des dates de défaillances, tirées aléatoirement selon des lois probabilistes. C'est pourquoi de nombreuses simulations seront nécessaires avant de faire converger le résultat.

1.1.3 Les autres indicateurs classiques

De nombreux indicateurs classiques existent. Sans avoir vocation de liste exhaustive voici les principaux utilisés par VME.

Coefficient de valeur : Il s'agit du rapport des flux actualisés sur l'investissement. Il permet d'établir des corrélations entre investissement et flux monétaires pour un ensemble de stratégies.

$$CV = \frac{\sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1 + \alpha)^n}}{I} \quad (1.5)$$

Temps de retour : C'est le délai entre l'investissement et le basculement positif de la VAN

$$I = \sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1 + TRI)^n} \quad (1.6)$$

Taux de rentabilité interne : C'est le taux d'actualisation minimal annulant la VAN. Il est utilisé pour déterminer le taux d'actualisation utilisé par la compagnie.

$$I \leq \sum_{n=0}^{TRI} \frac{F_n}{(1 + \alpha)^n} \quad (1.7)$$

1.1.4 Termes liés à la maintenance

Il existe deux grandes familles de maintenances : la maintenance préventive et la maintenance corrective. Pour une meilleure compréhension de la suite de ce mémoire, en voici une définition selon (Lyonnet, 1992).

Maintenance préventive : cette politique de maintenance s'adresse aux éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles classés comme importants pour l'entreprise. Il existe deux formes de maintenance préventive :

- La maintenance préventive *systématique* qui s'adressera à des éléments ne revenant pas trop chers en changement.
- La maintenance préventive *conditionnelle* qui conviendra pour des matériels coûtant cher en remplacement et pouvant être surveillés par des méthodes non destructives (analyse de vibration, de l'huile, de la température etc.).

Ces deux stratégies différentes permettent d'organiser une maintenance visant à minimiser ces arrêts tout en ne devenant pas trop onéreuse.

Maintenance corrective : c'est une maintenance qui est exécutée lorsqu'une machine est en panne, cela sous-entend que lorsqu'elle fonctionne aucune action préventive n'est faite. En général ce type de méthode engendre une perte importante d'heures de production, diminue la disponibilité et la sécurité. Pour être viable, cela nécessite d'avoir des pièces de rechange en stock, que les équipes de maintenance attendent la panne et sont rapidement disponibles.

En maintenance, comme le préconise le célèbre adage "Mieux vaut prévenir que guérir", toutefois certains équipements exploités dans des conditions particulières ne laissent pas d'autre choix que celui de la maintenance corrective.

1.2 Présentation et justification de VME

Si à l'origine la gestion d'actifs était consacrée à la gestion d'investissements, aujourd'hui les enjeux sont ceux de la gestion de portefeuille au cours du temps. Puisque les coûts et les

pannes sont des événements aléatoires et dépendent du temps et afin d'obtenir des résultats significatifs, les simulations de Monte-Carlo sont un outil tout indiqué permettant d'obtenir de bons résultats et ainsi de supporter les décisions prises.

VME est un outil de gestion d'actifs développé par EDF R&D (Lonchamp, 2017) dont l'objectif est d'évaluer et de comparer des stratégies de maintenance exceptionnelles. Originellement conçu pour l'étude de la maintenance des tranches nucléaires françaises, l'outil semble pouvoir s'adapter au besoin d'Hydro-Québec en termes de maintenances des turbines hydrauliques. Au travers d'une collaboration avec les équipes d'EDF, VME est l'outil choisi dans le cadre de cette analyse technico-économique. La suite de ces études aura donc une double vocation : à la fois, tester VME, voir s'il est adapté au besoin formulé par Hydro-Québec, et réaliser une première analyse économique. La fin de ce chapitre va donc s'attacher à décrire le fonctionnement du logiciel.

1.2.1 Les grands principes

Dans VME, chaque stratégie de maintenance exceptionnelle (*ME*) est comparée à une stratégie de base à l'aide de différents indicateurs : Valeur actualisée nette (*VAN*), Taux de rentabilité interne (*TRI*), Temps de retour sur investissement (*Tr*), Coefficient de valeur (*CV*). L'outil fournit pour chacun de ces indicateurs la valeur espérée, son écart-type, sa distribution et son évolution temporelle. Trois éléments de base sont utilisés dans VME : les ressources matérielles (ou composants), les tranches et les stratégies. Pour chaque composant d'intérêt, une grande variété d'informations peut être utilisée : valeur, délai d'approvisionnement, niveau actuel de stock, seuil minimal du stock, coût du stockage, stratégie d'approvisionnement. Notons, par contre, que ces valeurs sont supposées fixes pour la durée couverte par l'étude. Pour chaque tranche, des événements ayant un impact sur le composant d'intérêt sont définis. La distribution statistique de chaque événement, ainsi que les maintenances correctives et exceptionnelles en lien avec cet événement sont aussi documentées. Pour chaque maintenance, la distribution statistique de l'événement suite à la maintenance, les conséquences de cette dernière (coûts programmés, coûts fortuits, nombre de jours d'indisponibilité programmée, nombre de jours

d'indisponibilité fortuite, puissance de fonctionnement perdue ou gagnée, charges d'exploitation), la durée des conséquences, ainsi que les ressources matérielles utilisées sont saisies. Toujours pour chaque tranche, l'évolution temporelle de différents paramètres financiers peut être considérée : coût quotidien d'une indisponibilité programmée, coût quotidien d'une indisponibilité fortuite, puissance de fonctionnement perdue ou gagnée, valeur du *kWh*, coefficient d'indisponibilité fortuite, charges d'exploitation.

Enfin, des stratégies de ME doivent être définies. Plusieurs paramètres peuvent être utilisés : durée, taux d'actualisation court terme et long terme, liens entre événements, nombre de simulations de Monte-Carlo, nombre de points pour les distributions. Une fois les calculs faits, une variété de graphiques peuvent être produits, en particulier, la distribution et série temporelle de la VAN, ainsi que des flux financiers, coûts et indisponibilités des deux stratégies. Il est aussi possible d'illustrer la série temporelle de différentes probabilités dans les deux stratégies (ex : événement d'intérêt).

1.2.2 Le modèle

VME fonctionne via une interface graphique. Pour renseigner une stratégie de maintenance, il faut renseigner des informations selon quatre niveaux :

- Moyens de production (unités de production).
- Événements (défaillance d'un composant).
- Parades (Maintenance d'un composant).
- Ressources (pièce de rechange).

La figure 1.2 permet de visualiser les interactions entre ces différents blocs. Chacun de ces quatre types de blocs à ses spécificités, détaillées ci-dessous.

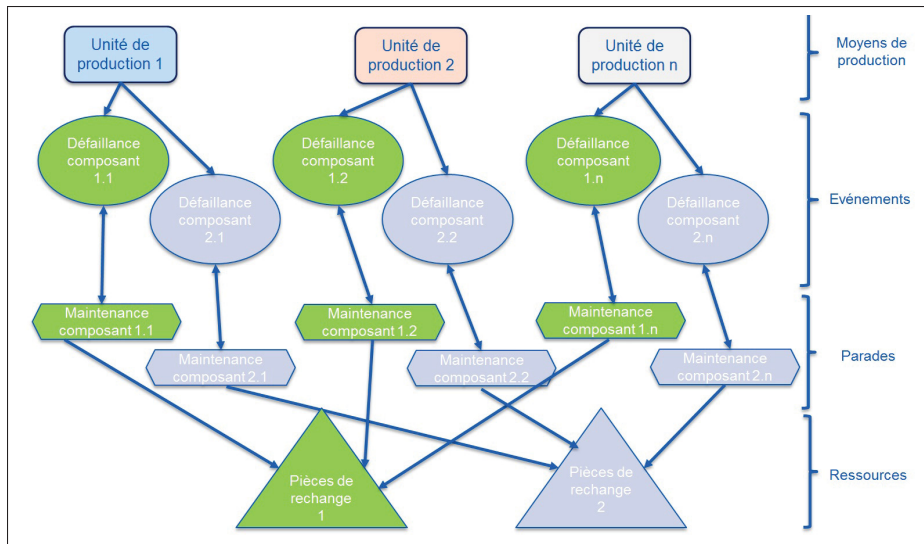


Figure 1.2 Interactions entre les blocs dans VME

1.2.2.1 Moyens de production

Ce bloc (figure 1.3) permet de définir l'objet sur lequel travailler. Dans notre cas il s'agira principalement de roues ou d'aubes de turbines hydrauliques. L'onglet contient quatre volets.

- Caractéristiques : Les propriétés de la tranche.
- Événements : Permet de sélectionner les événements qui seront reliés à cette tranche.
- Arrêts : Permet de définir les arrêts de la tranche à l'aide d'une date, d'une durée et d'un nom.
- Valorisation : Permet de définir les coûts de production et pénalités de non-productions en cas d'arrêts.

1.2.2.2 Événements

Les événements caractérisent les occurrences d'apparition de phénomènes. Ils sont définis (figure 1.4) par des lois probabilistes. Avec ou sans dégradation, un clic sur les champs « lois » permet de définir la loi voulue et ses paramètres.

Tranche

Caractéristiques Evénements Arrêts Valorisations

Nom : Roue 1

Année de mise en service : 1970

Durée d'exploitation : 50

Etat : En fonctionnement

Ok Annuler

Figure 1.3 VME - Création d'une tranche

Evénement

Nom : EtatCritique

Type fiabilité : Avec dégradation

Loi de dégradation : Exponentielle (Age=0.0, lambda=0.0)

Loi de défaillance : Exponentielle (Age=0.0, lambda=0.0)

Echelle de temps : Temps calendaire

Ok Annuler

Figure 1.4 VME - Création d'un évènement

1.2.2.3 Parades

Il s'agit de toutes sortes de maintenances : préventives ou correctives, conditionnelles ou non. Les onglets disponibles (figure 1.5) peuvent varier, mais définissent tout ce qui peut être lié à ces maintenances. Les maintenances correctives se déclenchent automatiquement lorsqu'une défaillance a lieu. Les maintenances préventives peuvent être basées sur un critère d'âge de la roue ou sur un critère de date.

L'onglet Déclencheurs permet de relier une maintenance aux événements qui la déclenchent tandis que l'onglet Événements enfant permet de relier la maintenance aux événements sur

lequel elle aura des conséquences (principalement une modification de la loi de fiabilité). L'onglet Conséquences permet d'attribuer des coûts à la maintenance. Sitôt que le bloc est appelé, les coûts ou indisponibilités sont alors pris en compte. Dans le cas de maintenances préventives conditionnelles, il ne faut donc pas ajouter les coûts à ce niveau-là. L'onglet Ressources permet d'indiquer le lien entre une maintenance et les stocks de pièces nécessaires pour la maintenance.

The screenshot shows a software window titled "Maintenance préventive" with a tabbed interface. The "Caractéristiques" tab is selected. The form contains the following elements:

- Nom :** A text field containing "Inspection 6 ans".
- Type :** A dropdown menu showing "Conditionnelle Inspection".
- Type d'application :** A dropdown menu showing "Immédiat".
- Type de planification :** A dropdown menu showing "Dates".
- Coût annuel de surveillance ou coût d'inspection :** A text field containing "10.0".
- Probabilité de fausse alarme :** An empty text field.
- Probabilité de non détection :** An empty text field.
- Dates de mise en oeuvre :** A list box containing the following dates: 1976-01-01, 1982-01-01, 1988-01-01, 1994-01-01, 2000-01-01, 2006-01-01, 2012-01-01, and 2018-01-01.
- Buttons:** "Ajouter" and "Supprimer" are located to the right of the date list. "Ok" and "Annuler" are at the bottom right of the window.

Figure 1.5 VME - Création d'une maintenance

1.2.2.4 Ressources

Les blocs Ressource (figure 1.6) permettent de définir les stocks, et stratégies d'approvisionnement de pièces nécessaires. Tous les coûts et délais en fonction du temps peuvent être inscrits dans cette fenêtre et ses deux onglets : Caractéristiques et Stocks. Cela permet notamment

de gérer des stocks de pièces communs à plusieurs centrales, mais cela ne concerne pas cette étude.

Ressource

Caractéristiques **Stocks**

Nom : Nouvelle Roue

Quantité actuelle : 0

Délai d'approvisionnement : 1.5

Coûts d'approvisionnement unitaire :

1970	1000.0
1971	1000.0
1972	1000.0
1973	1000.0
1974	1000.0
1975	1000.0
1976	1000.0

Coûts de stockage :

1970	0.0
1971	0.0
1972	0.0
1973	0.0
1974	0.0
1975	0.0
1976	0.0

Coûts temporels de mise à disposition :

1970	0.0
1971	0.0
1972	0.0
1973	0.0
1974	0.0
1975	0.0
1976	0.0

Coûts forfaitaires de mise à disposition :

1970	0.0
1971	0.0
1972	0.0
1973	0.0
1974	0.0
1975	0.0
1976	0.0

Buttons: Compléter, Effacer, Copier, Coller (repeated for each table)

Ok Annuler

Figure 1.6 VME - Création d'une ressource

1.2.2.5 Utilisation dérivée des blocs

Tous ces blocs ont été créés dans le but de remplir une fonction précise. Toutefois cela reste pour des stratégies simples et des enchaînements classiques. Pour simuler des comportements un peu différents et plus complexes que ceux initialement prévus, une utilisation dérivée de ces

quatre blocs peut s'avérer très judicieuse. Il s'agit donc de programmation graphique très bas niveau.

1.2.2.6 Liens entre les blocs

Après avoir créé des blocs et complété les lois de comportement et autres coûts, il est possible de les relier entre eux pour les faire interagir. Les dates sont tirées aléatoirement au début de la simulation, en fonction de cela différents événements se déclenchent comme indiqué dans le modèle à la figure 1.7. Après chaque maintenance ou inspection, une nouvelle date d'occurrence est tirée selon la loi probabiliste choisie.

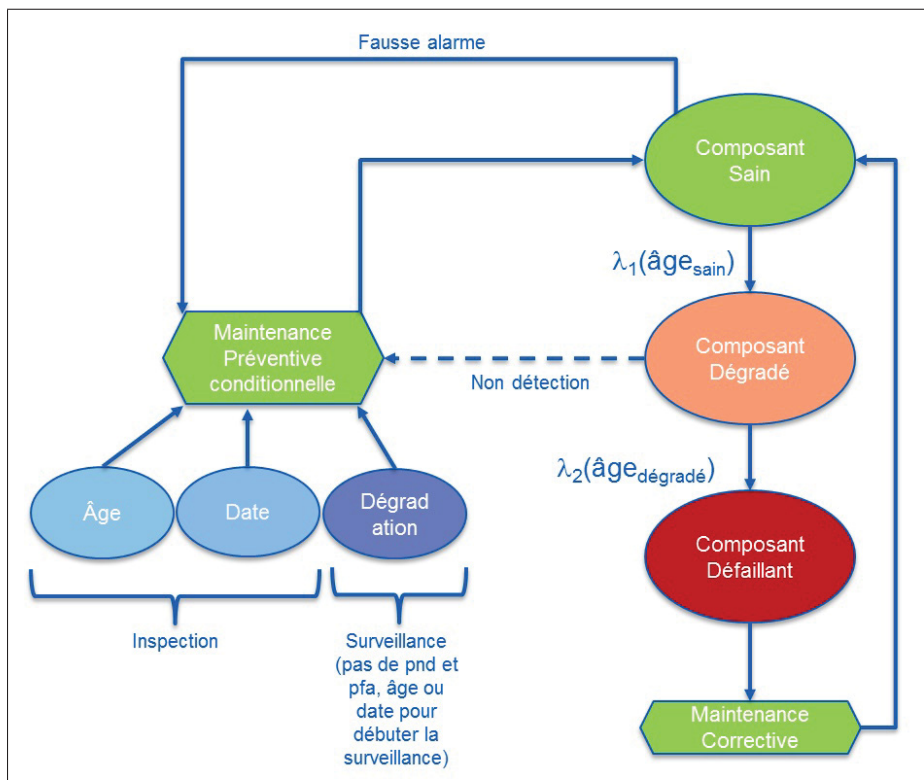


Figure 1.7 Évolution d'un composant sous VME
(Lonchamp, 2017)

1.2.3 Simulation de Monte-Carlo

Afin de calculer la VAN probabiliste d'une stratégie de gestion d'actifs industriels, VME réalise une simulation de Monte-Carlo sur le modèle événementiel de la figure 1.8. Cette simulation est faite, pour chaque itération, en parallèle pour les deux stratégies (stratégie de référence actuelle et stratégie à évaluer), afin de prendre en compte les éventuelles corrélations entre les flux.

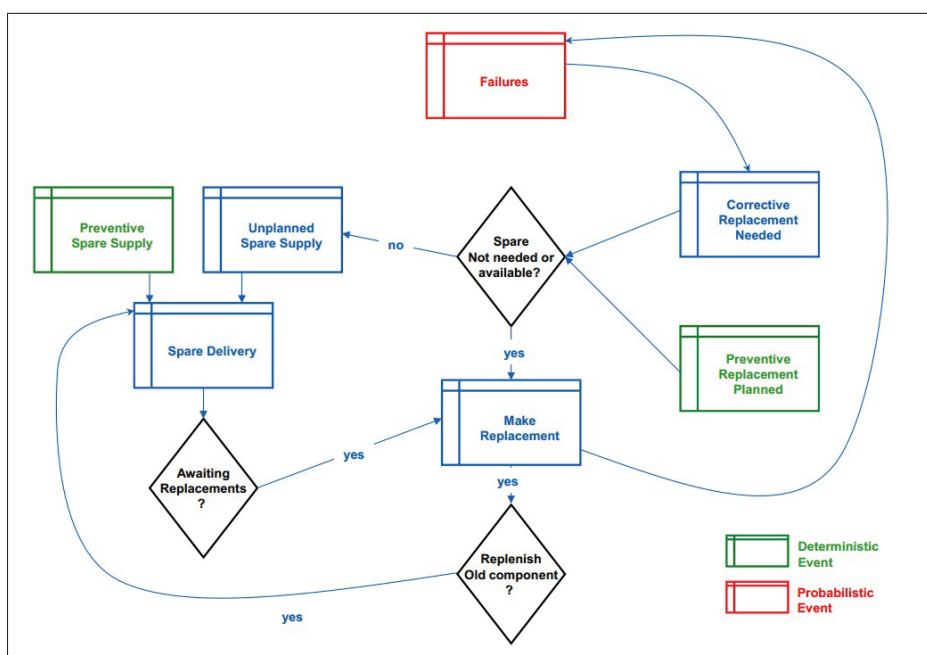


Figure 1.8 Principe de fonctionnement de VME
(Lonchampt, 2017)

Afin de vérifier la qualité des résultats obtenus, une analyse de convergence doit être réalisée. Elle permettra de certifier que le nombre de simulations nécessaire au calcul est atteint.

CHAPITRE 2

MODÈLE DE FISSURATION

La fissuration est (jusqu'à la formation de la fissure) un phénomène de fatigue entraînant la propagation de défauts dans la roue de la turbine. Les défauts initialement minuscules se transforment en profondes entailles. À cause des méthodes d'inspection utilisées, le phénomène n'est pas observable en dessous d'un certain seuil. Rien n'est observable jusqu'à ce que la fissure apparaisse. Et lorsqu'une fissure est constatée, il est difficile de prédire son comportement futur ; il faut immédiatement réparer la roue sachant que la fissure risque de propager très rapidement. En premier lieu, une revue de littérature permet de comprendre les enjeux et la physique de la fissuration des roues de turbines. C'est ensuite la présentation de l'élaboration du modèle sous VME, son évolution, ses résultats et ses limites qui sont abordés.

2.1 Revue de littérature

Le phénomène de fissuration est complexe, toutefois certains chercheurs ont mis au point des méthodes permettant d'estimer les probabilités de propagations des défauts en fonction des diverses intensités de contraintes lors du fonctionnement des turbines. Cette brève revue de littérature permet de comprendre les enjeux de la fissuration : sa physique, la manière actuelle de la réparer et les lois de fiabilité qui y sont liées. Celles-ci représentant les intrants principaux des modèles présentés dans ce mémoire, il est important d'en comprendre les tenants et aboutissants.

2.1.1 La fissuration : un phénomène physique

Comment passer de défauts minimes à la perte d'aubes ? De seuil d'acceptabilité à loi de défaillances ? De lois de défaillances à probabilités de bris ? L'origine du bris, sa raison et sa probabilité d'occurrences sont autant d'informations qui permettent de comprendre la mécanique de la rupture par propagation de la fissuration.

2.1.1.1 Les défauts : origine du bris

Lors de la conception de la roue, certains défauts sont initialement présents dans le matériau. Même si la roue est inspectée ceux-ci ne peuvent être détectés afin d'être réparés. Ils sont pourtant inévitables et sont également les principales causes de dégradation des roues. Ces défauts peuvent généralement être classés en deux catégories : les défauts de surface et les défauts internes tels que présentés à la figure 2.1. Chacun d'eux possède ses caractéristiques et évolue différemment. Selon (Gagnon *et al.*, 2013b), les plus critiques sont les défauts internes près de la surface car difficile à détecter comparativement aux défauts de surface. Toutefois dans un souci de simplification de calculs et de réduction du nombre de paramètres, l'hypothèse est faite que ceux-ci sont équivalents à des défauts de surface semi-circulaire.

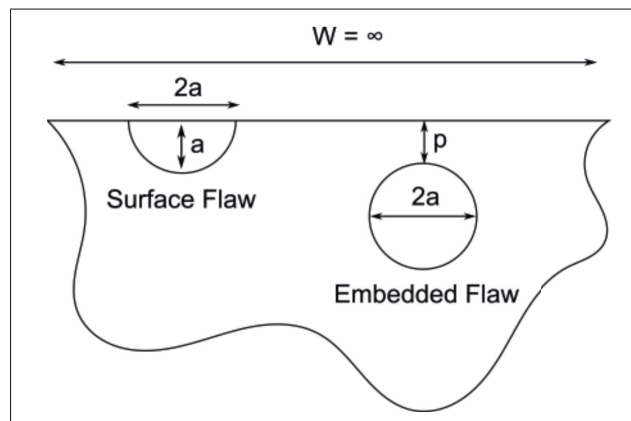


Figure 2.1 Fissuration - Types de défauts
(Gagnon *et al.*, 2013a)

2.1.1.2 Les cycles HCF/LCF : raison du bris

La fissuration est un phénomène de fatigue : elle n'apparaît pas spontanément, mais après la propagation générée par un nombre de cycles de chargement. Pour les turbines deux types de cycles sont identifiés.

Les cycles à basse fréquence et forte amplitude (LCF – Low Cycle Fatigue) : Ils correspondent aux arrêts et démarrages de la turbine. Ils sont donc peu nombreux, mais impliquent une charge très grande et toute l'inertie de démarrage. Ce sont eux qui vont générer la propagation des défauts. Les cycles à haute fréquence et faible amplitude (HCF – High Cycle Fatigue) : ils correspondent à une rotation de la roue et ont donc une fréquence de plusieurs Hertz. Plus ils sont élevés plus ils risquent de dépasser le seuil de propagation entraînant ainsi une propagation rapide de la fissure. Ces deux comportements se combinent pour former ce qu'on appelle un bloc de chargement. Comme présenté dans la figure 2.2 ces deux types de cycles se combinent.

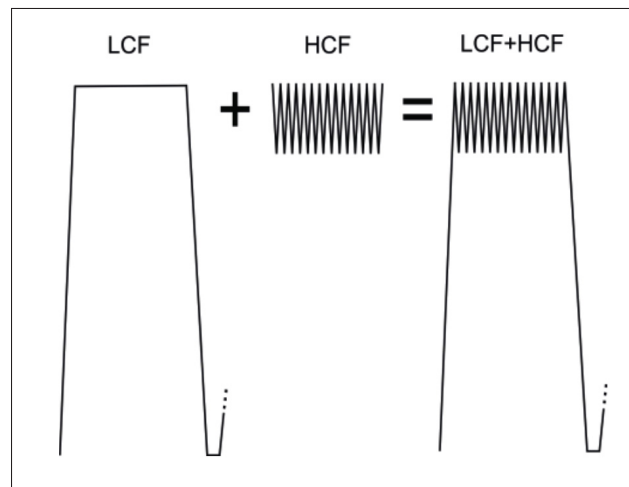


Figure 2.2 Fissuration - Blocs de chargement
(Gagnon *et al.*, 2013a)

Les calculs de propagation en fonction du chargement LCF permettront de modéliser l'effet de l'évolution des défauts en fonction du temps. Ces calculs sont réalisés comme prévu dans la norme BS7910.

2.1.1.3 Le diagramme de Kitagawa : état limite pour le bris en fissuration

(Kitagawa & Takashi, 1976) ont défini la manière de calculer l'état limite à partir duquel des cycles de chargement contribueront à la propagation de fissure. Tant qu'un défaut se situe dans la zone de non-propagation, il n'y a pas de risque. Plus le nombre d'arrêts-démarrages aug-

mente, plus la taille du défaut croît. Le défaut se déplace alors vers la droite dans le diagramme présenté à la figure 2.3. À partir du moment où le défaut franchit la limite ΔK_{onset} qui correspond au seuil de propagation défini par (Gagnon *et al.*, 2013a), il y aura propagation de fissure. La propagation est définie par la loi de Paris qui stipule que $\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$ où N représente le nombre de cycles, ΔK la variation du facteur d'intensité de contrainte sur un cycle, C et m des coefficients dépendants du matériau.

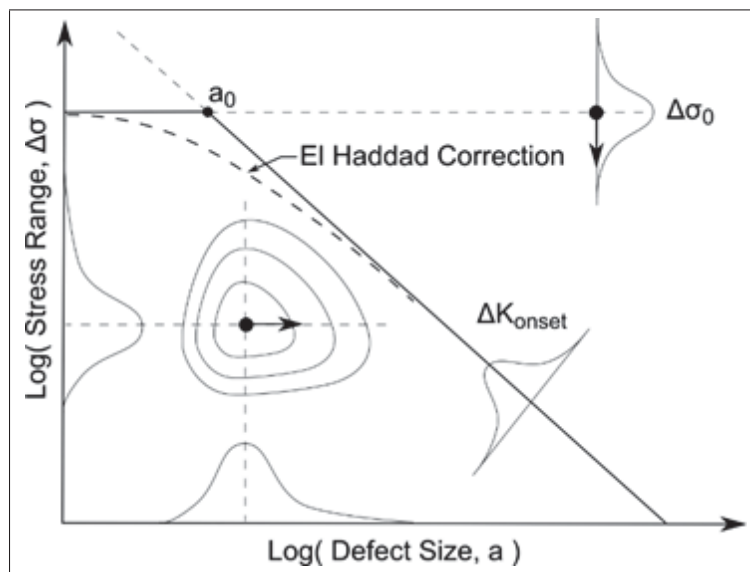


Figure 2.3 Diagramme de Kitagawa
(Kitagawa & Takashi, 1976)

La partie LCF fait croître les défauts (axe des abscisses) et la partie HCF (axe des ordonnées) doit rester dans la zone sécuritaire définie par l'état limite. Plus le nombre de cycles (HCF + LCF) augmente, plus la fissure se propage rapidement ce qui peut mener dans certains cas jusqu'à détachement des aubes. C'est pourquoi il faut réparer les bris lorsqu'on les détecte.

Dans le cadre des modèles considérés, certaines variables utilisées sont déterministes, à savoir qu'elles sont entièrement prévisibles en fonction d'événements passés, tandis que d'autres sont probabilistes et suivent des variables aléatoires.

Les variables déterministes du modèle utilisé sont :

- Seuil de propagation.
- Limite d'endurance.
- Amplitude des contraintes LCF.
- Nombre de cycles de contraintes LCF.

Et les variables probabilistes sont :

- Dimension pour des défauts semi-circulaires de surface.
- Amplitude des contraintes HCF.

Ces cycles et modèles permettent d'établir la fiabilité d'une roue.

2.1.1.4 Fiabilité : probabilité d'occurrence du bris

La fiabilité d'une roue est définie comme la probabilité de dépasser l'état limite du diagramme de Kitagawa présenté précédemment. Pour obtenir la probabilité de dépasser l'état limite, une approximation de type « First Order Reliability Method » (FORM) est utilisée. La probabilité obtenue permet d'assigner un niveau de risque de fissuration aux aubes d'une roue de turbine donnée comme décrit par (Gagnon *et al.*, 2013a). Les paramètres de l'état limite dans le diagramme de Kitagawa sont des propriétés incertaines du matériau. Les valeurs des paramètres du matériau sont assignées de façon conservatrice afin de délimiter une zone considérée sécuritaire. Ce qui signifie que c'est la probabilité de ne plus être dans la zone sécuritaire qui est calculée et non la probabilité de fissuration réelle de l'aube de turbine. Dans le modèle utilisé, la grosseur du défaut (axe des abscisses sur le diagramme de Kitagawa) évolue en fonction du nombre de blocs de chargement (cycles départ/arrêt de la turbine) imposés à la structure. Notons toutefois que ces calculs ne seront pas réalisés dans le cadre de la présente étude. Il s'agit de la manière d'obtenir les données, mais dans un premier temps des cas fictifs seront étudiés et ce sont les données du rapport de (Boudreau & Lonchampt, 2016) qui seront utilisées.

2.1.2 Stratégie actuelle de réparation

La stratégie actuelle de réparation de turbines consiste à inspecter chaque roue une fois tous les six ans. Cette valeur est actuellement fixe : un des objectifs de cette étude sera d'explorer dans

quelle mesure il est possible de l'optimiser. Lors de chaque inspection, deux constats peuvent être faits : la roue est brisée (fissures apparentes) ou elle ne l'est pas. Dans le cas de la détection d'une fissure, une réparation est faite sur-le-champ. Sinon la turbine est relancée. La prochaine inspection aura alors lieu six ans plus tard. Toutefois, deux comportements viennent altérer ce schéma élémentaire : si la turbine a plus qu'un âge donné (50 ans dans ce cas-ci), une nouvelle roue sera commandée et la roue actuelle sera remplacée plutôt que réparée. Par ailleurs, en fonction des disponibilités en centrale, en cas de réparation nécessaire le groupe pourra être relancé temporairement avant d'être réparé. Les précédents énoncés sont résumés sur la figure 2.4. A noter qu'à des fins de compréhension, il s'agit là d'une version simplifiée de la stratégie de réparation adoptée. Le schéma global est celui similaire à celui énoncé, mais les décisions ne sont pas actées aussi simplement.

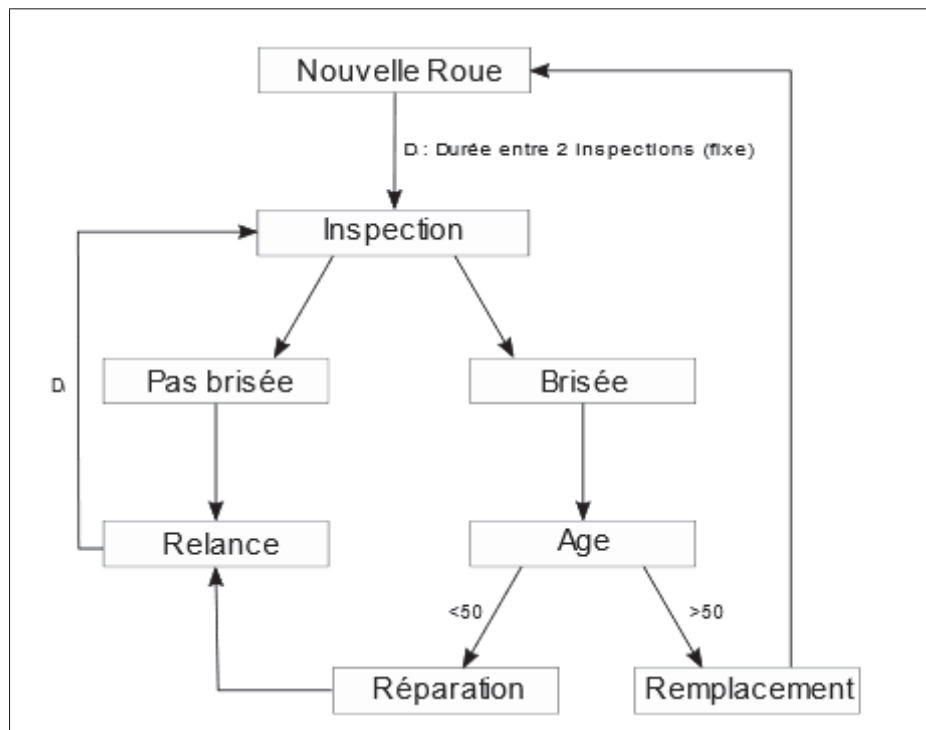


Figure 2.4 Stratégie actuelle de maintenance des roues de turbines

La politique de réparation inconditionnelle tient ses origines de trois éléments. D'une part, le phénomène de propagation de fissures est à ce jour encore mal connu. D'autre part, les inspections sont très éloignées les unes des autres et enfin, les coûts élevés d'interventions. À partir du moment où un bris apparaît à la surface d'une aube, plus le temps passe et plus la taille de ce bris croît. Et plus le bris est grand, plus l'intervention de réparation sera longue. Et plus elle sera longue, plus les coûts de réparation et de non-production seront élevés. Lors de la détection d'une fissure, le désir de minimiser les conséquences pousse à la réparation immédiate. En effet, une fissure peut rapidement dans certains cas mener à la perte d'un morceau d'aube voire d'une aube complète puis de plusieurs aubes et finalement à une défaillance complète de la roue. En quelques mots la stratégie de maintenance pourrait être résumée de la sorte : en cas de problème on répare et si la roue est amortie, on la change. L'objectif des travaux présentés dans ce rapport est de déterminer s'il est possible d'optimiser cette stratégie pour minimiser les coûts d'entretien et de production sur le long terme.

2.1.3 Le modèle de fiabilité

Pour commencer l'étude, la fréquence d'apparition et propagation sont supposées connues. Ces lois de la physique seront les entrants d'une étude réelle et les calculs doivent être faits en amont de l'analyse économique. L'objectif de ce rapport est l'élaboration du modèle. Les données d'entrées seront à établir avec les experts de chez Hydro-Québec et relatives à chaque étude de cas. La figure 2.5 résume la manière dont les connaissances seront traitées : le présent rapport s'attache à la construction du modèle technico-économique.

2.1.3.1 Notions de fiabilité appliquées à la roue

À titre d'exemple et à des fins d'analyse de sensibilité, ce sont les trois courbes de fiabilité (roue fiable, moyennement fiable et à haut risque de fissuration) issues du rapport de (Boudreau, 2013) qui constitueront les données d'essais. Ces courbes sont présentées sur la figure 2.6.

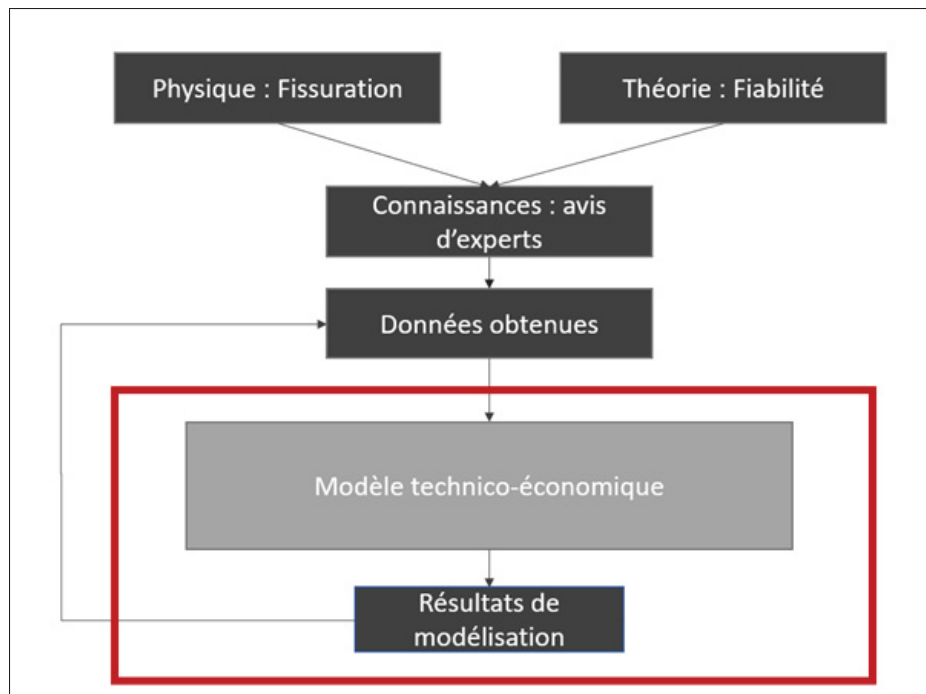


Figure 2.5 Focalisation sur le modèle

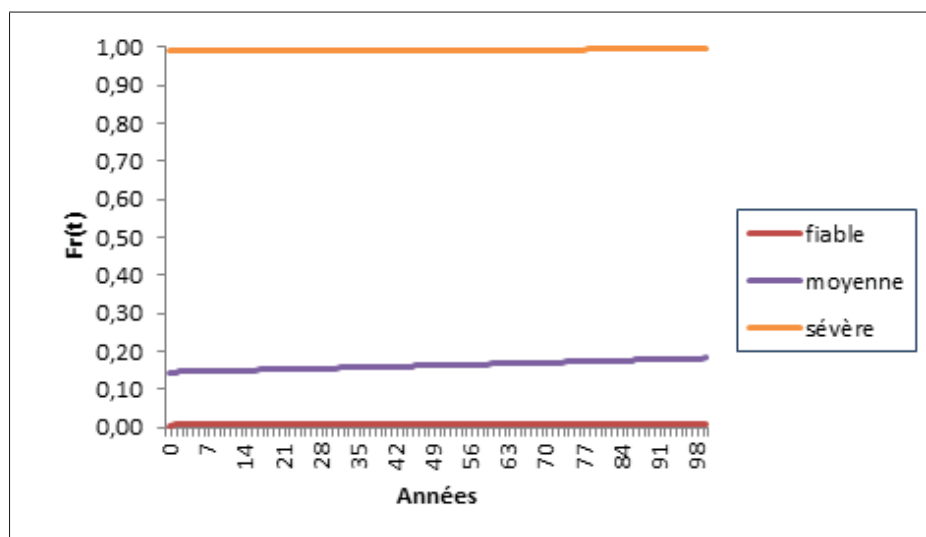


Figure 2.6 Exemples de lois de dégradation

Dans un premier temps, seule la courbe de données intermédiaires, relativement linéaire, sera retenue. Les valeurs sont calculées à partir des méthodes d'estimation de la propagation de bris présentées par (Gagnon, 2014) dans le rapport de projet PréDDIT. On obtient la probabilité

qu'une aube soit fissurée à l'instant t , notée F_a :

$$F_a(t) = P_r(X \leq t) \quad (2.1)$$

Pour ce qui est des notions de fiabilité, (Rausand, 2004) les définit comme suit. Il s'agit là de la fonction de répartition des aubes, avec :

- X : la variable aléatoire du temps de fissuration d'une aube.
- t : l'âge de la roue en années.

À cette fonction de répartition est associée la fonction de fiabilité R_a :

$$R_a(t) = 1 - F_a(t) = P_r(X > t) \quad (2.2)$$

Or, c'est la fiabilité globale de la roue qui est cherchée. Une nouvelle variable aléatoire T est alors présentée, elle correspond au temps de fissuration d'au moins une des aubes. Ce qui revient à considérer que la roue est un système d'aubes en séries. La roue étant constituée de 13 aubes indépendantes, la fiabilité de la roue est :

$$R_r(t) = R_a(t)^{13} = P_r(T > t)$$

Et la fonction de répartition :

$$F_r(t) = 1 - R_r(t) \quad (2.3)$$

Par construction des courbes de fiabilité, la probabilité de fissuration d'une des aubes entre l'instant $t - dt$ et t est :

$$P_r(t - dt < T < t) = F_r(t) - F_r(t - dt) \quad (2.4)$$

Pour calculer la probabilité de défaillance à l'instant t sachant que la roue était en fonctionnement à l'instant $t - dt$, les probabilités conditionnelles sont utilisées :

$$P(A | B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (2.5)$$

Donc :

$$P_r(t - dt < T < t \mid T > t - dt) = \frac{P_r(t - dt < T < t \cap T > t - dt)}{P_r(T > t - dt)} \quad (2.6)$$

Or :

$$(T > t - dt) \subset (t - dt < T < t) \quad (2.7)$$

Soit :

$$P_r(t - dt < T < t \mid T > t - dt) = \frac{P_r(t - dt < T < t)}{P_r(T > t - dt)} \quad (2.8)$$

Et donc :

$$P_r(t - dt < T < t \mid T > t - dt) = \frac{F_r(t) - F_r(t - dt)}{R_r(t - dt)} \quad (2.9)$$

2.1.3.2 Un premier modèle simple, cœur de l'étude

Concernant l'évolution de la courbe de fiabilité, il y a trois cas auxquels faire face :

- La roue est une roue neuve (ou remplacée).
- La roue vient d'être réparée (inspection avec bris).
- La roue vient d'être inspectée, mais sans conséquence (inspection sans bris).

Chacun de ces trois cas est abordé séparément, puis suivra une série de quelques exemples de scénarios.

2.1.3.2.1 La roue est neuve

La roue sort de l'atelier et va être installée dans un barrage pour la première fois. Elle n'a donc jamais fonctionné ni été testée. Ainsi, si un défaut initialement présent se situe juste en dessous de la surface, il ne sera pas identifié avant le montage. La seule manière de savoir s'il y a un défaut est de faire tourner la turbine et de procéder à une inspection après un certain temps de fonctionnement : un bris est alors constaté. C'est en prenant en compte cette considération que les courbes de fiabilité sont établies. Si la turbine neuve démarre, ses probabilités de défaillance sont connues. Si à chaque inspection, un remplacement a lieu, la courbe de fiabilité sera réinitialisée périodiquement tel que présenté figure 2.7.

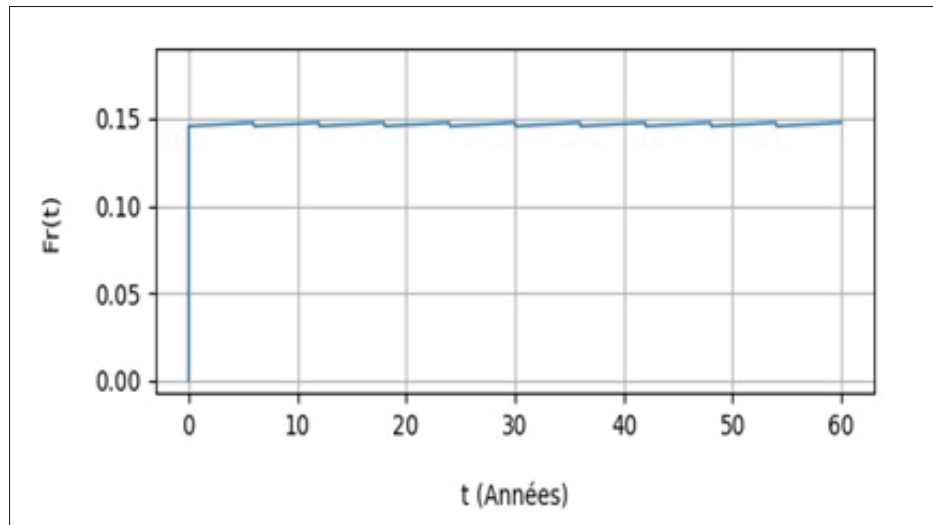


Figure 2.7 Probabilité conditionnelle de bris si bris puis remplacement systématique

2.1.3.2.2 La roue vient d'être inspectée, il n'y avait pas de bris

Il s'agit d'une configuration où la roue a au moins six ans (où le nombre d'années D_i entre deux inspections) et où lors de l'inspection aucun bris n'est détecté. Il n'y a donc pas de défaut et la roue est en état de fonctionnement. S'il y avait eu un défaut, il se serait propagé et il y aurait une fissure observable. Bien qu'il y ait une probabilité qu'un défaut soit passé au-dessus du seuil suffisamment récemment pour ne pas s'être propagé. Dans le modèle cette probabilité est supposée nulle. La probabilité conditionnelle à l'absence de bris donnera le comportement présenté à la figure 2.8.

2.1.3.2.3 La roue vient d'être réparée

À la suite d'une des inspections aux six ans, la roue a été déclarée brisée. Il a donc fallu la réparer. Lors de la réparation, par soudage, de nouveaux défauts sont ajoutés à la roue. Si ceux-ci sont en surface, il est possible de combler d'éventuels manques de matière. En revanche, si une anfractuosité sous la surface a été introduite lors du soudage, il n'y a, comme lors de l'installation d'une nouvelle roue, aucun moyen de le détecter. La courbe de fiabilité n'étant

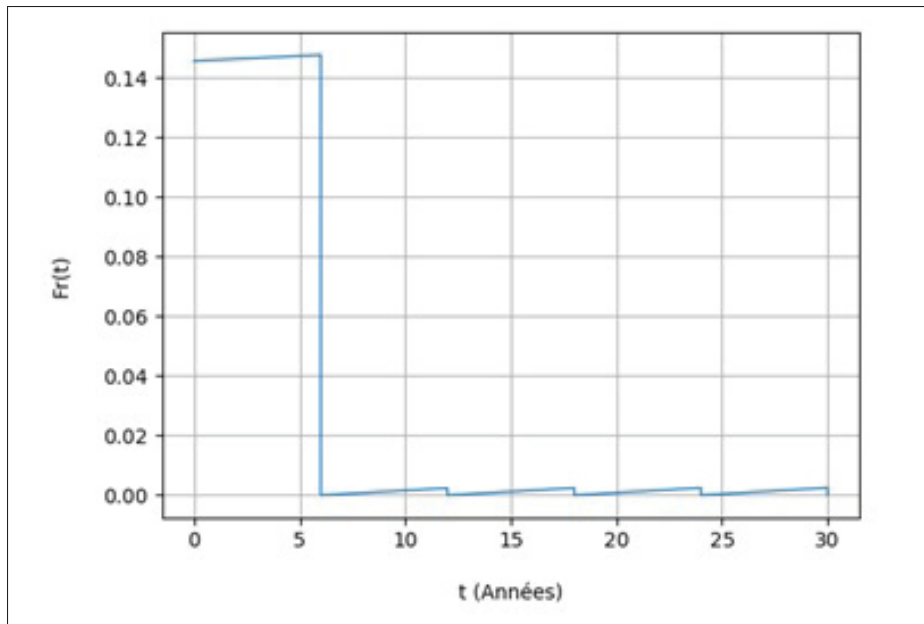


Figure 2.8 Probabilité conditionnelle de bris si aucun bris

pas nécessairement identique à celle d'une roue neuve. Il s'agit encore d'une problématique de défauts au premier usage et les probabilités conditionnelles ne peuvent plus être utilisées.

2.1.4 Modélisation simplifiée

D'après les données fournies, la propagation de défauts entraîne une loi de dégradation quasiment linéaire. Afin de représenter ces phénomènes de réparations, deux lois de dégradations distinctes seront utilisées : une loi dite neuve et une loi dite usagée. Chacune de ces lois sera définie par une ordonnée à l'origine et une pente, la loi usagée ayant des paramètres de plus grande valeur. Les quatre paramètres feront plus tard l'objet d'analyses de sensibilité.

La fissuration est un phénomène physique qui a pour origine les défauts de construction de la roue. En dessous d'une certaine taille, ces défauts ne sont pas alarmants. Toutefois les conditions d'utilisation des turbines peuvent amener ces défauts à grandir et dépasser un seuil de criticité au-delà duquel le bris se propage rapidement. Les deux facteurs principaux entraînant cette propagation sont le nombre de cycles d'arrêt et démarrage de la turbine et les contraintes liées à la rotation de la roue.

D'une part, notre faible connaissance et les conditions d'exploitations mènent à une stratégie conservatrice qui lorsqu'une fissure est observée lors d'une inspection, celle-ci est réparée automatiquement.

D'autre part, ces modèles de propagations permettent d'établir des courbes de fiabilité qui servent aux modèles prédictifs. Ces derniers peuvent évoluer différemment à l'issue de chaque inspection de turbine. La roue peut alors être en bon état, à réparer, ou à remplacer. Cela permet d'avoir une idée plus précise du comportement des turbines hydrauliques. La prochaine section reprendra ces informations auxquelles s'ajoutera la perspective financière. L'objectif étant d'obtenir la connaissance quant aux stratégies de maintenances les plus rentables.

2.2 Entrée du modèle

L'objectif est donc de modéliser le phénomène de fissuration sous VME. Si le côté technique est la première tâche à implémenter, l'aspect économique ne doit pas être laissé de côté. Bien que le premier cas étudié soit un cas fictif permettant de voir jusqu'où VME peut répondre au besoin de l'IREQ, les données utilisées seront issues d'une étude faite au préalable. Ces roues sont habituellement remplacées préventivement lorsque l'exploitant juge qu'il n'a plus d'autre choix. Un des phénomènes de vieillissement menant au remplacement des roues est la fissuration des aubes. Dans le cadre du projet PréDDIT (Gagnon, 2014), des courbes de la probabilité de fissuration dans le temps ont été estimées. Le nombre de cycles de 'démarrage – arrêt' de la roue ainsi que le nombre de cycles de marche à vide/démarrage sont des paramètres importants pour déterminer la courbe de dégradation à utiliser pour une roue en particulier. Les modèles créés auront donc pour but de modéliser la pensée des experts présentée précédemment.

2.2.1 Les données

L'étude fictive commence en 1970 et s'étend sur une durée de 50 ans (âge moyen de renouvellement des roues). Les valeurs ont été choisies arbitrairement et ne sont pas représentatives de la réalité.

Le taux d'actualisation d'Hydro-Québec Production est confidentiel, nous choisirons dans le cadre de cette étude un taux d'actualisation de 5,5%.

Les tableaux suivants représentent l'information et les ordres de grandeur des paramètres liés à la réparation (modification de la loi pour une loi dégradée) et au remplacement (modification de la loi pour remise à zéro de la loi initiale).

Tableau 2.1 Informations générales

Grandeur	Valeur
Intervalle d'inspections	6 ans
Coût d'inspection	(inconnu)
Durée de l'inspection	(inconnu)
Production quotidienne	16,7 k\$

Tableau 2.2 Informations réparation

Grandeur	Valeur
Raison	Bris détecté
Coût de l'intervention	50 k\$
Durée de réparation	aléatoire [14 jours – 6 mois] Probabilité décroissante
Fiabilité inspection suivante	Probabilité conditionnelle

Tableau 2.3 Informations remplacement

Grandeur	Valeur
Frais d'installations	500 k\$
Durée totale de l'intervention	6 mois
Coût d'achat d'une roue	8000 k\$
Durée d'amortissement	50 ans
Durée de livraison d'une nouvelle roue	2 ans
Coût annuel d'entreposage d'une roue	0 k\$
Gain en rendement	0%
Gain en puissance	10%, 15% ou 20%
Gain économique	167\$ par % supp. - 610 à 1219 k\$ /an

2.2.2 Les scénarios à l'étude

VME est doté d'un simulateur de Monte-Carlo pour estimer de manière probabiliste les flux financiers et risques de pannes. Il est relativement coûteux en calcul et n'est donc, à ce titre, pas couplé à un optimisateur par défaut. De ce fait, les scénarios de maintenance sont à définir. Afin de décrire les scénarios, deux types de variables sont distinguables. D'une part ce qui touche purement aux stratégies de maintenance et d'autre part les paramètres qui touchent à la physique. Ces derniers donneront de la souplesse au modèle. Les avis d'experts – sur lesquels les hypothèses sont faites aujourd'hui - qui seront obtenus au cours de l'étude et permettront alors d'affiner les travaux et d'améliorer le modèle.

2.2.2.1 Scénarios liés à la maintenance

Les scénarios simples et extrêmes sont les suivants :

- Ne jamais effectuer de réparation ou remplacement.
- Réparer systématiquement en cas de bris.
- Remplacer systématiquement en cas de bris.
- Remplacer systématiquement à intervalle fixe (exemple à chaque inspection).

Un paramètre sur lequel il est facile de jouer est la fréquence des inspections. Il serait intéressant d'étudier la possibilité d'une inspection aux deux ans, aux six ans, aux 15 ans et le scénario sans inspections sur la durée de vie des turbines. Pour l'instant, les roues sont commandées au besoin, il serait intéressant d'étudier l'intérêt d'en avoir systématiquement une en stock. Et ce dès la mise en service, 10 ans, 20 ans, 30 ans ou 40 ans après. De même, si la pertinence de posséder une roue est incertaine, quand réaliser l'implantation ?

- Après x années.
- Après y réparations.
- Après la n-ième réparation depuis la z-ième année.
- Après la z-ième année depuis la n-ième réparation.

Avec les frais d'actualisation, les dates de paiement d'une nouvelle roue ont peut-être de l'influence : quand payer ?

- À la commande.
- À la livraison.
- Moitié/moitié.
- Avec délais.

L'analyse sous VME pourrait permettre d'établir la pertinence de ce critère.

2.2.2.2 Scénarios liés à la physique

Il a été défini dans le modèle qu'une roue réparée vieillissait plus vite qu'une roue neuve, en associant une vitesse de dégradation arbitraire. Pourtant il s'agit là d'une donnée essentielle du problème. Comment rétablir la fiabilité après réparation ? Ce sont les experts qui le diront pour chaque étude de cas spécifique. Le modèle doit permettre une flexibilité à ce niveau-là. À l'issue de la réparation, la roue est-elle aussi bonne que neuve (AGAN), dans le même état que juste avant la réparation (ABAO), dégradée (WTO), ou améliorée (BTO) ? Et dans ces deux derniers cas, dans quelle mesure ? Dans le cas d'une inspection où l'on ne constate aucun bris, la probabilité de bris est supposée nulle. Mais c'est une hypothèse. Dans les faits, il y a peut-être déjà un bris sur le point d'apparaître, mais qui n'a pas été constaté au moment de l'inspection. Cette valeur est inconnue, mais VME pourrait aider à déterminer le coût de cette incertitude. Et ainsi potentiellement l'intérêt de préciser cette information.

2.2.2.3 Conclusion

Dans un premier temps la turbine sera modélisée puis les essais seront faits sous VME. Ensuite pour préciser le modèle, l'avis d'experts sera nécessaire et permettra de s'approcher au mieux de la physique.

2.2.3 La construction du modèle sous VME

La modélisation du phénomène de fissuration est assez complexe. Le comportement des bris et l'utilisation des lois de fiabilité telle qu'expliquée dans la première partie de ce rapport représentent un réel enjeu économique pour les exploitants de turbines. Pour cela une succession de modèles du plus simple au complexe sera présentée.

2.2.3.1 Premier modèle : inspection et remplacement

Pour commencer la modélisation, seulement deux types de réparations sont prises en compte (figure 2.9) :

- Une maintenance préventive au bout de 30 ans (valeur arbitraire).
- Une inspection aux six ans.



Figure 2.9 Modèle simple : Schéma

À chaque événement, VME associe une maintenance corrective obligatoire. Ainsi, par défaut, lorsqu'une pièce est défaillante elle est instantanément réparée. A chaque événement sont associées une loi de dégradation puis une loi de défaillance. Les maintenances correctives ne se déclenchent automatiquement que pour de la défaillance (et non pour la dégradation). Ainsi, pour éviter les réparations instantanées et n'avoir des réparations que lors des inspections, loi de dégradation est associée à la roue à laquelle sont appliquées les valeurs de la loi de défaillance (figure 2.10). La maintenance corrective n'est donc pas appelée. Toutefois, lors de la réalisation de la maintenance préventive aux six ans, la pièce est vue dégradée et une opération de maintenance peut être nécessaire.

La figure 2.11 permet de réaliser que VME prend systématiquement en compte les probabilités conditionnelles.

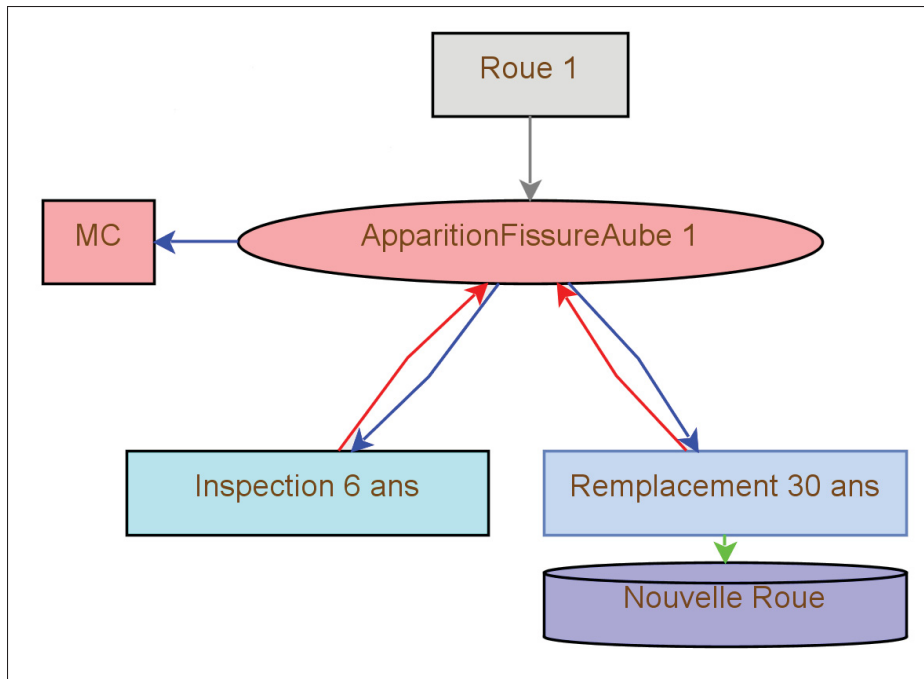


Figure 2.10 Modèle simple : Premier essai sous VME

Afin de pallier cela, la première valeur de la série de fiabilité est modifiée et fixée à zéro. Ainsi lors de la première année après un changement ou une réparation, la probabilité de bris est plus élevée.

Lors des réparations, les faibles valeurs obtenues montrent que le basculement sur le non-conditionnel n'est pas réalisé. Pour cela, une nouvelle hypothèse est posée : une roue réparée sera considérée comme une roue d'âge zéro. Les notions économiques seront traitées plus tard et de manière différente pour une roue réparée et une roue remplacée. Mais les probabilités de bris seront les mêmes dans les deux cas.

La figure 2.12 montre que suite aux réparations lors de la première inspection, les roues qui ont été réparées ont en partie à nouveau brisé (15% des 15% initiaux), ce qui engendre le second pic de maintenance en 1982, puis en 1988 avant de se stabiliser en 1994.

Analyse économique : la figure 2.13 présente ici une comparaison des deux scénarios, un avec inspections aux six ans et remplacement aux 30 ans, l'autre avec seulement un remplacement.

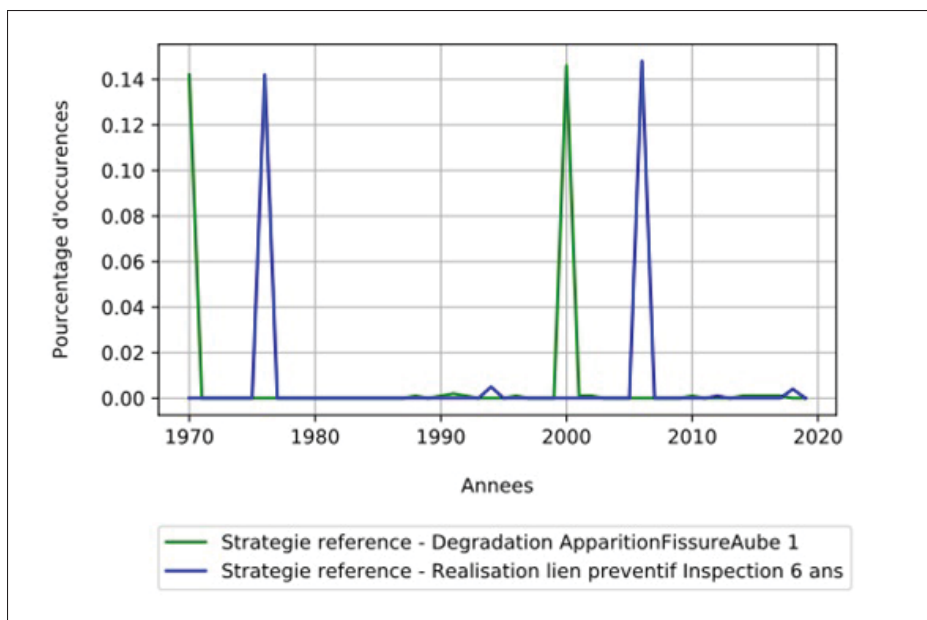


Figure 2.11 Modèle simple : Occurrences, Réparation ABAO

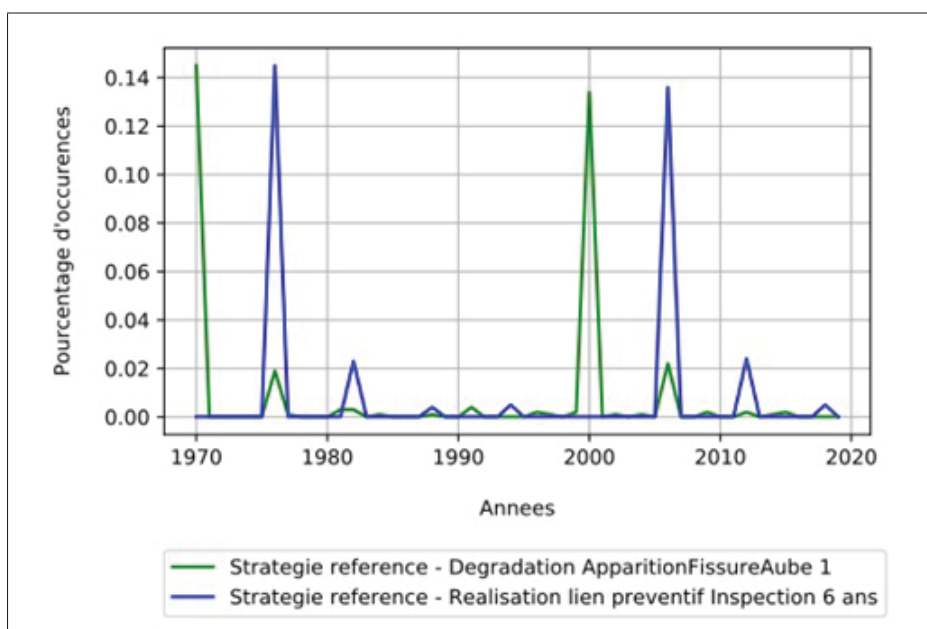


Figure 2.12 Modèle simple : Occurrences, Réparation AGAN

- La stratégie évaluée, en bleu, avec inspections aux six ans et remplacement en 2000.
- La stratégie de référence, en vert, avec seulement un remplacement en 2000.
- La VAN, différence des coûts des deux scénarios.

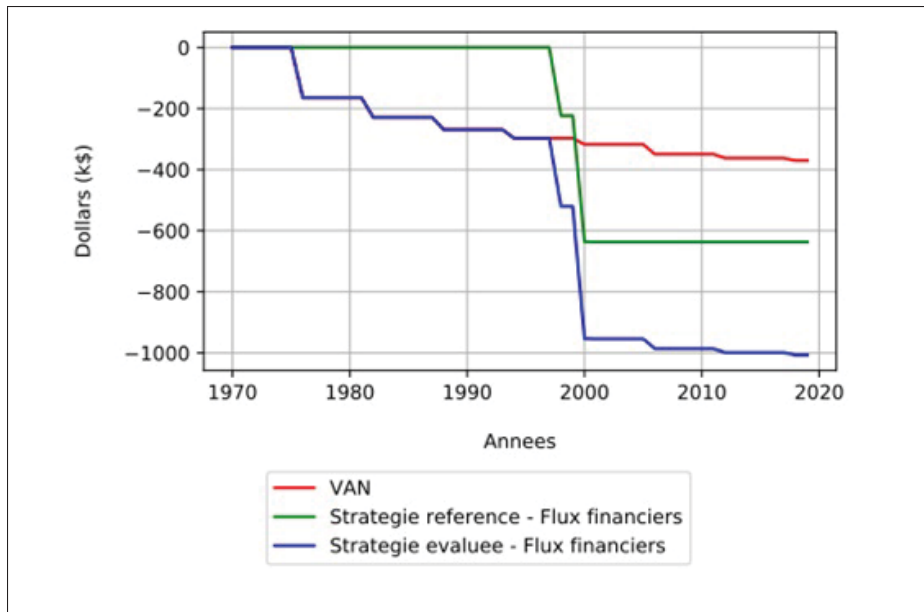


Figure 2.13 Modèle simple : Flux financiers, sans MC

À l'issue de cette simulation, la stratégie sans maintenance coûte beaucoup moins cher et la VAN est positive en tout temps. Cela vient du fait que la non-réparation n'est pas pénalisée. Ainsi, il est plus rentable de ne jamais réparer. Il faudrait alors une métrique pour quantifier cela. C'est pourquoi l'on ajoute une loi de défaillance : après 10 années de dégradation sans réparation, la roue est considérée brisée et un coût arbitraire de 20 000\$ y est associé. Ainsi, comme le montre la figure 2.14, il est préférable de réparer une roue plutôt que d'attendre alors qu'elle est dégradée.

Les coûts engendrés par la non-réparation viennent alors perturber les résultats obtenus précédemment. Pour la stratégie de référence : Tous les six ans, le coût s'amoin-drit. Il s'agit en fait des coûts d'inspections actualisés au cours du temps. Par ailleurs, comme constaté sur les diagrammes d'occurrences, les deux premières inspections conduisent à de plus nombreuses interventions. Les coûts sont donc plus élevés, ce qui accroît le phénomène d'actualisation. Lors du remplacement, des frais supplémentaires élevés sont ajoutés (on les retrouve sur les deux courbes -référence et évaluée). Puis, le même phénomène de maintenance accrue lors des deux premières inspections revient. Enfin les coûts d'inspections s'additionnent, apparaissant de plus en plus faibles à cause de l'actualisation.

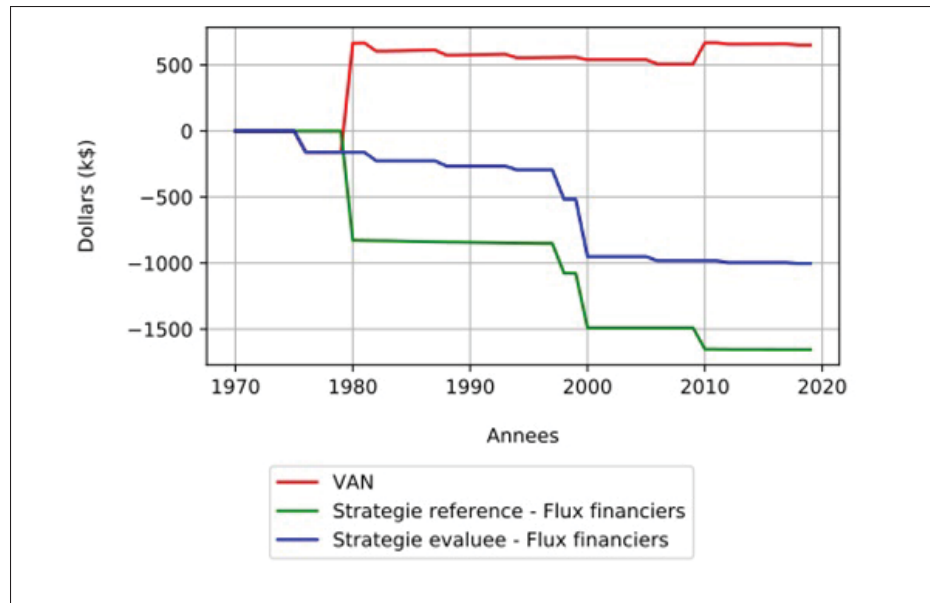


Figure 2.14 Modèle simple : Flux financiers, avec MC

Pour la stratégie évaluée : les seuls coûts sont ceux des pénalités de non-réparation, entraînant des coûts importants 10 ans après la mise en place d'une nouvelle roue. Les pertes en 1980 et en 2010 engendrent les mêmes coûts, encore une fois, c'est l'actualisation qui lisse les coûts à horizon lointain. La VAN est ici positive, ce qui signifie que la stratégie la plus rentable est la stratégie évaluée. À noter toutefois que la valeur de la VAN dans ce cas-ci est tout à fait arbitraire puisqu'elle intègre des valeurs choisies arbitrairement. Cependant, cela montre l'importance d'intégrer une pénalité à la non-réparation.

2.2.3.2 Deuxième modèle : des cycles pour des durées aléatoires

Dans le premier modèle effectué, les coûts sont identiques, quelles que soient les durées de réparation et tailles de bris. Le coût est alors moyenné, toutefois les tailles de bris sont des variables aléatoires étroitement liées au moment d'apparition des bris.

Les liens établis sont les suivants :

- La durée de réparation dépend de la taille du bris.
- La taille du bris dépend de la date depuis laquelle il se propage.

- Les inspections n’ont lieu que tous les six ans.
- Les réparations n’ont pas une durée identique donc les coûts de non-productions peuvent varier.

Ce qui est décrit à la figure 2.15.

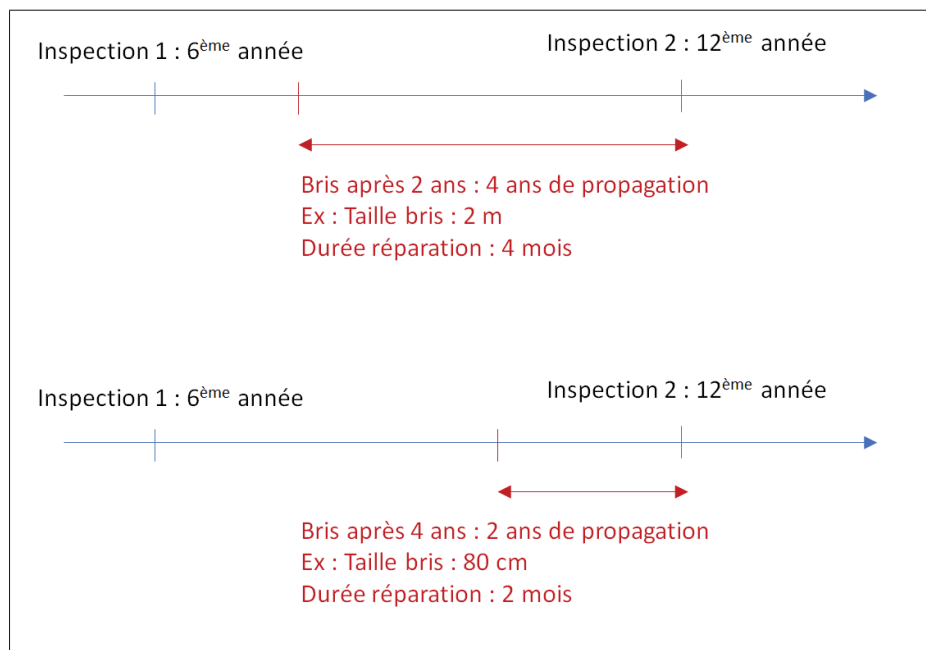


Figure 2.15 Influence du temps sur la taille du bû

La figure 2.16 montre les modifications de la structure du modèle pour implémenter cette notion de variables aléatoires :

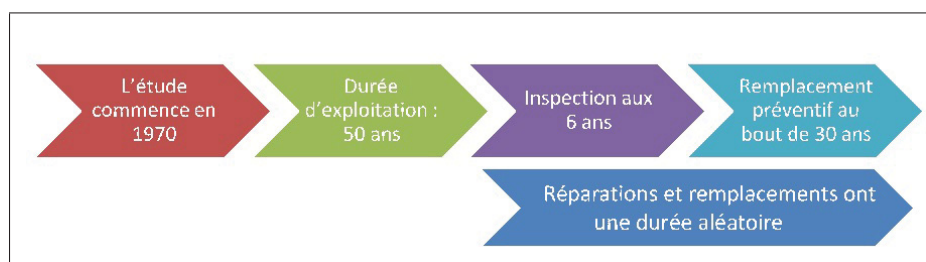


Figure 2.16 Schéma du modèle avec cycles

La figure 2.17 présente l'ajout du cycle de réparation pour la durée de réparation.

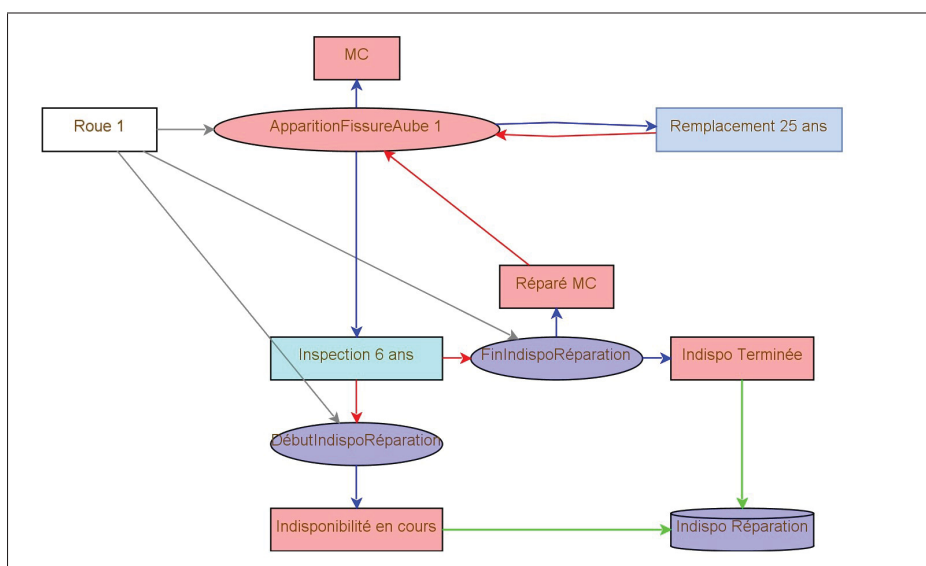


Figure 2.17 Modèle avec cycles : Cycles de réparation

La difficulté ici vient de rendre l'équipement indisponible pendant une durée aléatoire. En effet, s'il s'agissait seulement de définir la durée avant la réparation, les trois seuls blocs '*Inspection 6 ans*', '*FinIndispoRéparation*' et '*Réparé MC*' suffiraient.

Pour ce faire, au moment de l'inspection, d'une part l'évènement '*DébutIndispo*' en cours est déclenché, ce qui va immédiatement faire intervenir le bloc maintenance corrective '*Indisponibilité en cours*'. Dans celui-ci, il est indiqué que dès qu'il est appelé, la '*Roue 1*' devient indisponible (et entraîne donc une perte de production) jusqu'à la réalisation de la maintenance. Or la maintenance ne peut se réaliser que si la ressource '*IndispoRéparation*' contient un jeton (utilisation dérivée du bloc ressource qui sert initialement à modéliser les approvisionnements). Sauf que la ressource est vide au début de la modélisation.

En parallèle lorsque l'inspection veut déclencher la réparation suite à un bris, à l'évènement '*FinIndispoRéparation*' est associée une loi aléatoire (la loi de durée de bris). Dès que l'évènement se déclenchera, d'une part '*Réparé MC*' viendra affecter la loi de fiabilité et ajoutera les coûts de réparation aux frais de la simulation, d'autre part '*IndispoTerminée*' sera appelée.

Celle-ci viendra créer un jeton dans '*IndispoRéparation*' qui viendra à son tour clore l'indisponibilité en cours.

Ainsi la maintenance aura été correctement modélisée. Et le coût de réparation dépendra donc de la durée de réparation simulée par la loi insérée dans le lien entre '*Inspection*' et '*FinIndispoRéparation*'. Cette loi sera à définir dans un second temps par les experts. De la même manière, cycle de remplacement est ajouté pour la durée de remplacement, présenté figure 2.18.

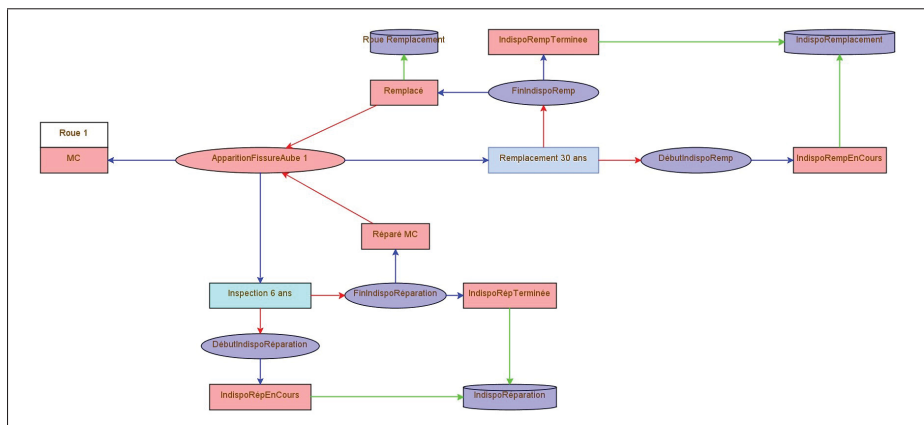


Figure 2.18 Modèle avec cycles : Cycles de réparation et remplacement

Si les durées sont étalées sur quelques mois, elles seront difficilement visibles annuellement, ce sont essentiellement les coûts qui sont modifiés. Pour visualiser le changement, une loi de remplacement qui s'étale sur deux ans est entrée. Ce qui explique sur la figure 2.19 que le second pic rouge est plus bas et plus large que précédemment.

2.2.3.3 Troisième modèle : des aubes en série

Les temps de réparation aléatoires étant modélisés, la loi de fiabilité va évoluer. Comme observé précédemment, dans VME pour simuler le manque de connaissance après une réparation ou un remplacement il faut remettre la roue à neuf en termes de fiabilité. Pour que la réparation ne remette pas la fiabilité à son état initial, cette dernière devrait être modifiée après réparation de telle sorte que la turbine se dégrade plus rapidement. Ainsi une turbine réparée est consi-

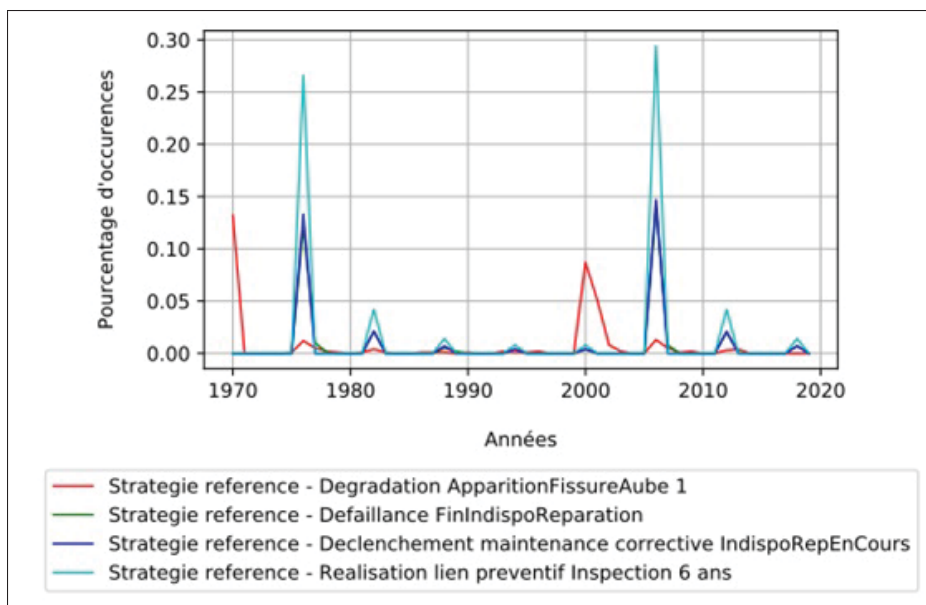


Figure 2.19 Modèle avec cycles : Diverses occurrences

dérée comme neuve par le logiciel, mais dans ses calculs il prend en compte une loi dégradée. Dans un souci d'obtenir un modèle plus réaliste, ce phénomène est modélisé par aubes en série plutôt que par une roue entière. Il a été établi en partie 2.1.3.1 que la loi de fiabilité de la roue de la turbine était issue du produit de la loi de fiabilité de chacune des 13 aubes. Il sera désormais supposé que la roue est en fait composée de 13 aubes en série. Chacune de ces aubes possédera une loi de fiabilité à l'état initial et une loi de fiabilité à l'état réparé. Pour commencer, un modèle avec seulement deux aubes séparées a été élaboré (figure 2.20). Ce système complexe est désormais en cours de révision par les équipes d'EDF R&D et une nouvelle fonctionnalité permettant de calculer une durée aléatoire est en cours de réalisation.

À chaque aube est associée une loi de dégradation et l'inspection est propre à chaque aube. Une fois ce modèle établi, les aubes et inspections sont dupliquées (figure 2.21) pour aboutir à un premier modèle de la roue complète.

Notons que le nombre d'inspections augmentent dans VME alors que les coûts d'interventions restent identiques sur machine. Afin de ne pas induire d'erreur dans le modèle il est important de n'attribuer les frais d'inspections fixes qu'à un seul des blocs de maintenance. L'attribuer à

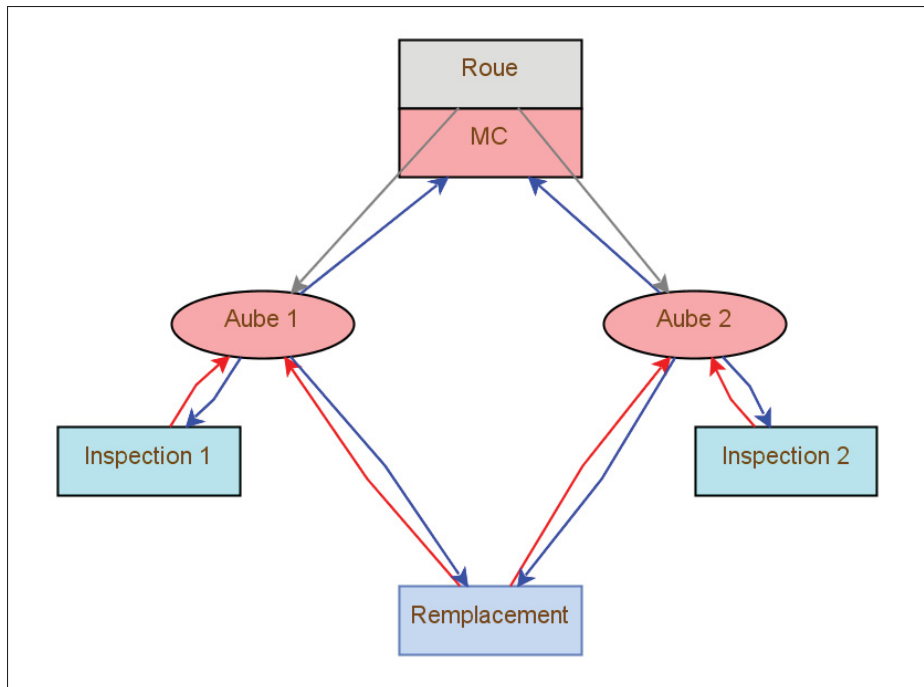


Figure 2.20 Modèle à deux aubes en séries sous VME

chacun des blocs divisé par le nombre de bloc reste également faisable, mais sera sujet à plus d'erreur. Nous adopterons donc la convention d'associer les frais fixes au bloc maintenance de la première aube.

2.2.3.4 Quatrième modèle : séparation de la courbe de fiabilité

Jusque-là une unique loi de dégradation a été considérée. Désormais, c'est la courbe de fiabilité attendue pour le système étudié qui va être analysée afin de modéliser son comportement et de le traiter plus précisément dans VME. La figure 2.22 est une courbe de fiabilité issue de du rapport de (Gagnon, 2014) qui a une allure classique de probabilités conditionnelles sur les roues de turbines, comme expliqué dans la partie 2.1.3. Il y a ici le cumul de trois phénomènes :

- La dégradation naturelle des turbines : c'est une pente croissante du temps. Plus le temps passe, plus la turbine est usée, plus elle a de chance de brisée. C'est un phénomène de vieillissement classique. Il est ici modélisé de manière linéaire.

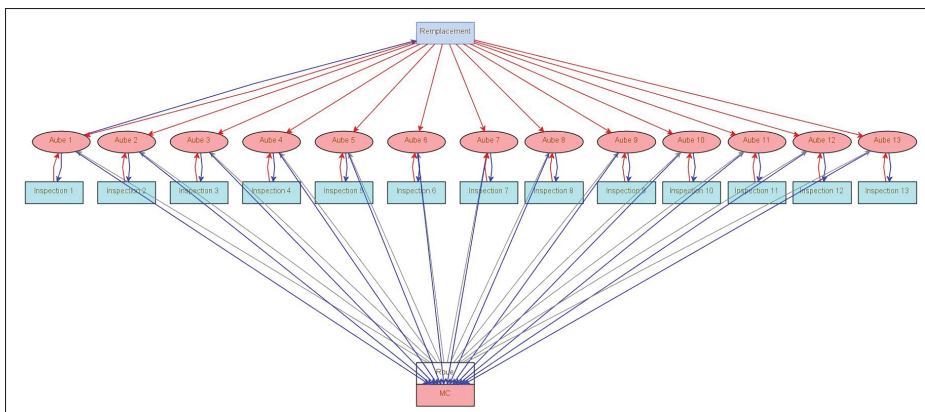


Figure 2.21 Modèle à treize aubes en séries sous VME

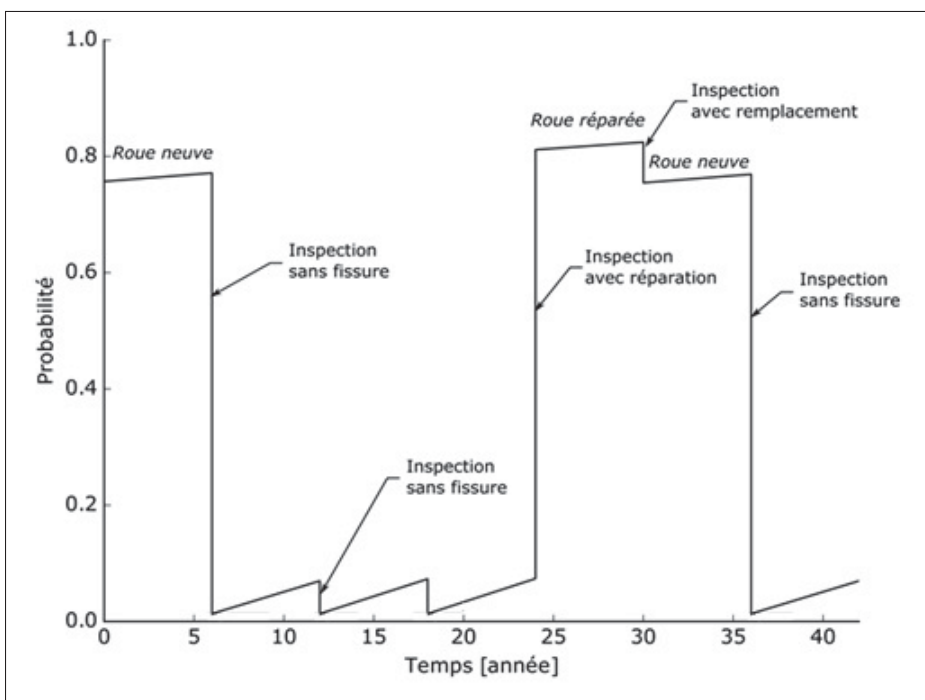


Figure 2.22 Probabilité de bris d'une aube au cours du temps

- Le manque de connaissance : À chaque nouvelle réparation ou remplacement, de nouveaux défauts sont insérés. Il n'est pas possible d'analyser ni de certifier que la turbine continuera à bien fonctionner, ce qui introduit une grande incertitude. Il s'agit là d'un phénomène de mortalité infantile. Il y a une impulsion à $t = 0$ qui est cumulée sous la forme d'un échelon

qui vaut un après une réparation ou un remplacement et disparaît après une inspection sans bris observé.

- Étant donné l'incertitude de mesure et les événements aléatoires, la probabilité de bris n'est jamais strictement nulle.

La figure 2.23 représente cette décomposition.

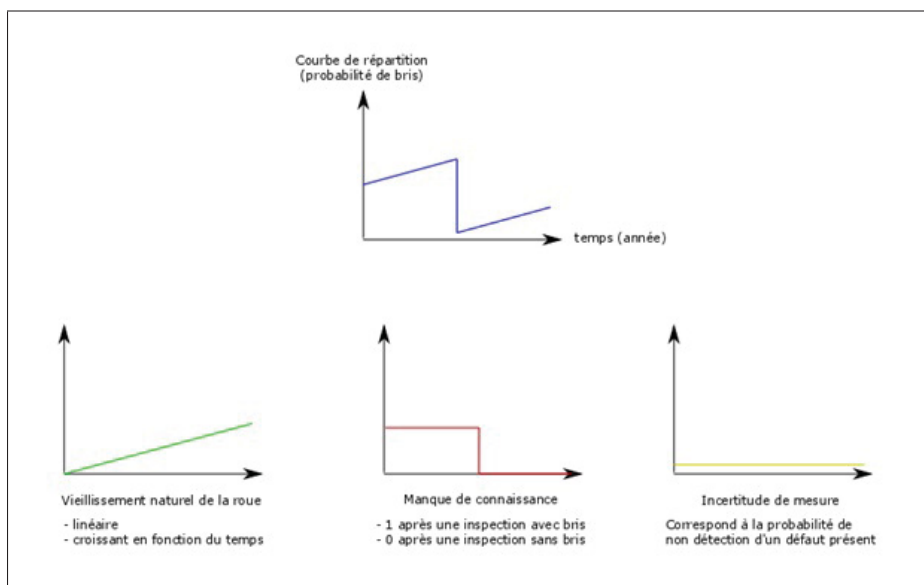


Figure 2.23 Décomposition de la probabilité de bris

Toutefois l'incertitude de mesure est considérée négligeable devant les autres grandeurs. Dans un premier temps, elle sera considérée nulle dans le modèle.

À l'issue de ce constat, la loi de fissuration est séparée en deux lois. Chacune de ces deux lois mènera à des défaillances et les conséquences des réparations ou remplacements agiront différemment sur ces deux lois.

2.2.3.4.1 La loi Mort-Né

Pour obtenir les valeurs, de cette loi qui simule le manque de connaissance, choisie est 15%. La loi commence à zéro et lors des six premières années elle est incrémentée graduellement

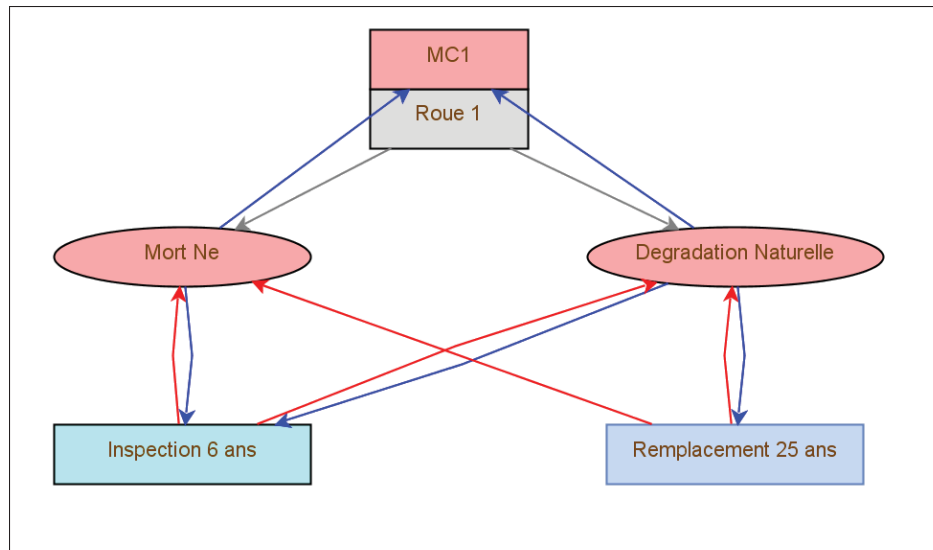


Figure 2.24 Modèle avec décomposition de la fonction de bris sous VME

d'un sixième de cette valeur de telle sorte qu'à la première inspection il y ait bien 14 % des cas où la roue soit brisée. Le phénomène de mortalité n'est pas graduel, cette manière de simuler les morts est purement visuelle dans VME. Toutefois, toutes les morts la première année ou un sixième des morts chaque année pendant six ans reste identique en terme de maintenance et de frais puisque l'inspection a lieu tous les six ans. Ensuite il n'y a plus de bris supplémentaire. Ce qui donne la loi présentée en figure 2.25.

Le comportement décrit dans le modèle suite aux inspections est le suivant :

- Inspection sans bris (pas d'opération) : pas de changement.
- Inspection avec bris (réparation ou remplacement) : remise à neuf.

2.2.3.4.2 La loi de dégradation naturelle

Pour que les deux lois soient complémentaires et qu'elles reforment la loi de fissuration initiale, la première valeur de la loi de fissuration initiale (traduite par la loi Mort-Né) a été supprimée. Ce qui donne alors uniquement la pente exprimée initialement, privée de son ordonnée à l'origine.

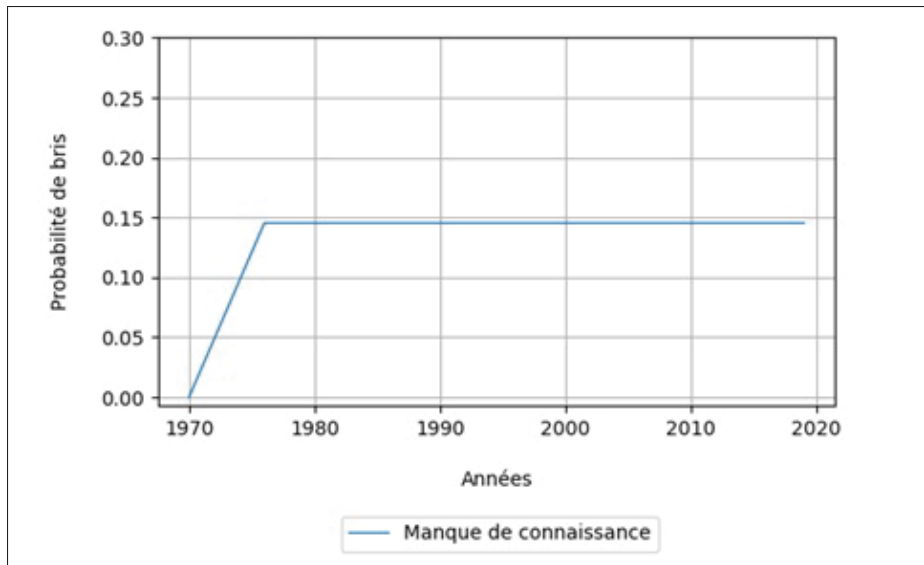


Figure 2.25 Loi de fissuration : Mort-Né

Le comportement décrit dans le modèle suite aux inspections est le suivant :

- Inspection sans bris (pas d'opération) : pas de changement.
- Inspection avec bris (réparation ou remplacement) : pas de changement.

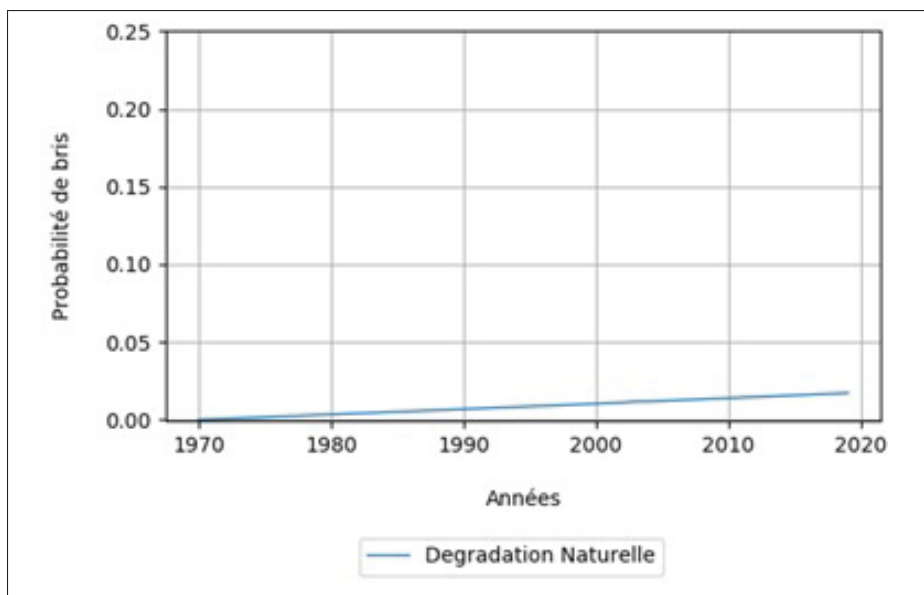


Figure 2.26 Loi de fissuration : Dégradation naturelle

C'est sur la dégradation naturelle (figure 2.26) que le modèle se précise puisqu'il n'y a plus de remise à zéro systématique après un bris. Ce qui donne un résultat visuel (figure 2.27) similaire à ceux obtenus précédemment. L'allure des réparations suite à un bris est la même. Ce qui est normal puisque le phénomène de mort-né qui génère le plus de bris ne change pas. Toutefois puisque le phénomène est quasiment linéaire et qu'une dérivation a lieu entre la loi de probabilité et le nombre d'occurrences, le nombre de bris n'est pas vraiment affecté dans notre cas. La modification sera plus visible dans le cas de lois plus complexes.

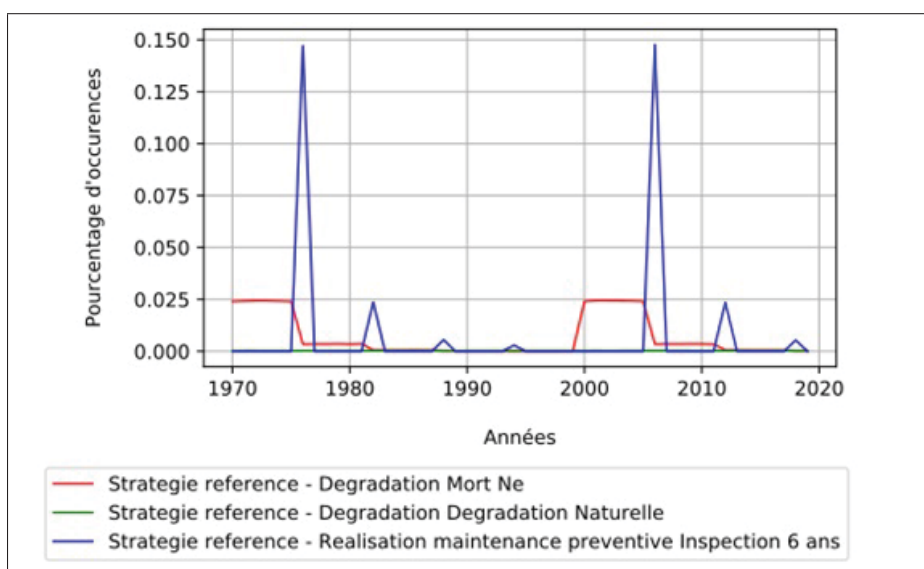


Figure 2.27 Séparation fiabilité : Occurrences

À des fins de vérifications, les lois d'entrées sont modifiées : la pente de la dégradation naturelle est alors croissante et plus élevée. Et le manque de connaissance est également plus marqué de telle sorte que la corrélation entre les deux lois soit visible sur la figure 2.28.

2.2.3.5 Cinquième modèle : insertion des conditions

Il serait intéressant d'étudier l'impact d'un remplacement systématique d'une roue une fois qu'elle a déjà brisé un certain nombre de fois. L'outil VME ne dispose pas de fonction du type «if... then... else... », il va donc falloir créer un ensemble de blocs pour simuler cet effet. Lors-

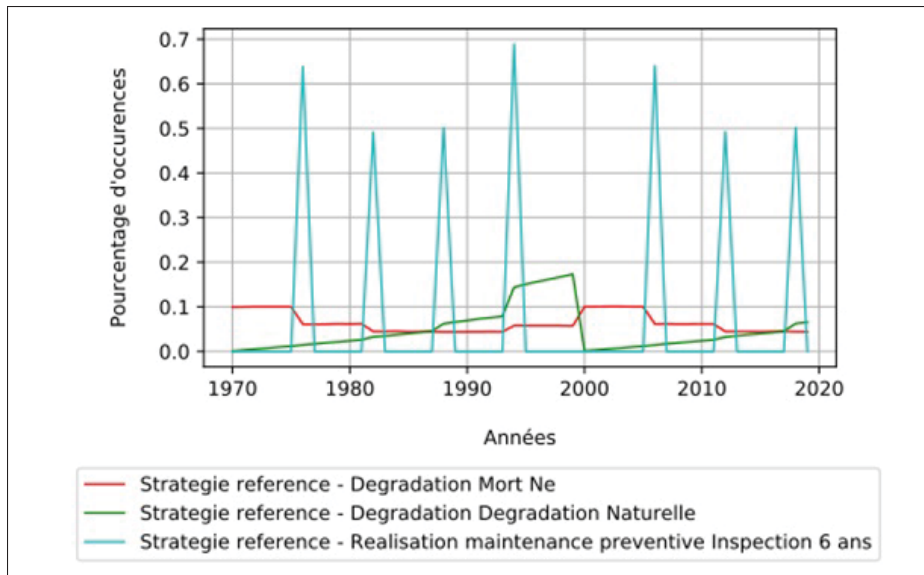


Figure 2.28 Séparation fiabilité : Occurrences, fortes pentes

qu'une inspection a lieu, au lieu d'influer directement sur la loi de fissuration, deux événements sont déclenchés : '*Opération*' et '*Comptage*' (figure 2.29).

Alors que '*Opération*' va commencer à influencer sur la suite, à savoir les réparations, comptage est relié à un bloc ressource appelé '*JetonRéparation*'. Le lien qui les unit prend pour information la quantité utilisée, dans laquelle la valeur -1 est renseignée. Ainsi à chaque inspection où un bris est détecté ('*Inspection 6 ans*' est une maintenance préventive conditionnelle et nécessite un bris pour se déclencher), un jeton est créé, ce qui permet de connaître le nombre de réparations depuis la dernière remise à zéro du nombre de jetons. Pendant ce temps-là, l'événement opération a déclenché deux blocs de maintenance corrective. ' $Répa < N$ ' et ' $Répa \geq N$ '. Le premier peut opérer directement. Tandis que le second est également lié au bloc ressource. À cet instant les deux blocs sont appelés et vont vouloir s'exécuter et potentiellement déclencher d'autres événements.

Ainsi, comme on le voit sur la figure 2.30, quoiqu'il arrive la maintenance ' $Répa < N$ ' n'est déclenchée et va affecter l'événement 'Lancement réparation'. De son côté, la maintenance ' $Répa \geq N$ ' ne se déclenche que si le nombre de jetons inscrit dans le lien (en vert) entre le bloc de maintenance et le bloc ressource correspond au nombre de jetons créés par l'événement.

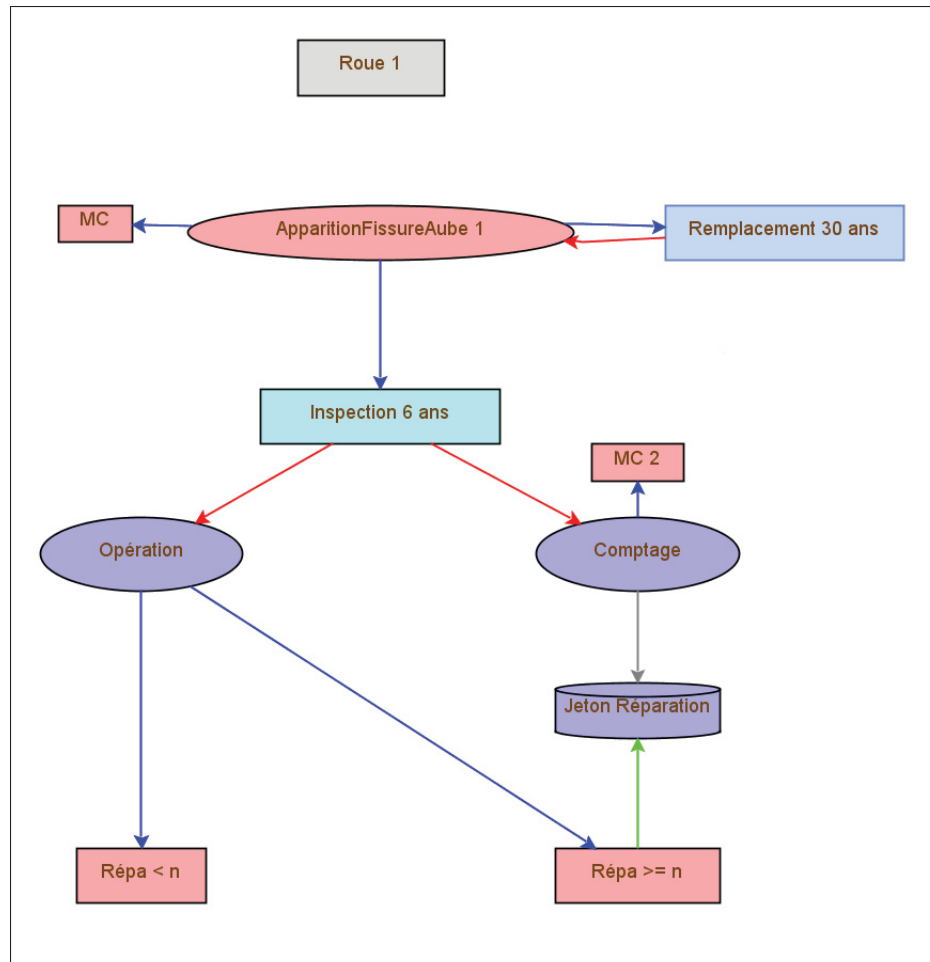


Figure 2.29 Ébauche du modèle de comptage sous VME

ment '*comptage*'. Dans le cas où le nombre de jetons n'est pas atteint, la réparation a lieu et pas le remplacement : tout se passe comme prévu, un jeton est créé et une réparation est enclenchée venant affecter la loi de fiabilité. Dans le cas où le nombre de jetons existant est égal au nombre de jetons nécessaires pour réaliser la maintenance $Répa \geq N$, l'évènement '*Lancement remplacement*' est déclenché. Toutefois, on peut observer que l'évènement '*Lancement réparation*' est également déclenché. En effet, celui-ci n'est lié à aucun processus de jeton et est appelé à chaque opération.

Toute l'astuce réside dans les synchronisations des lois en sortie des blocs de Maintenance Correctives. Dans chaque lien rouge est indiquée une nouvelle loi, pour la plupart des Dirac

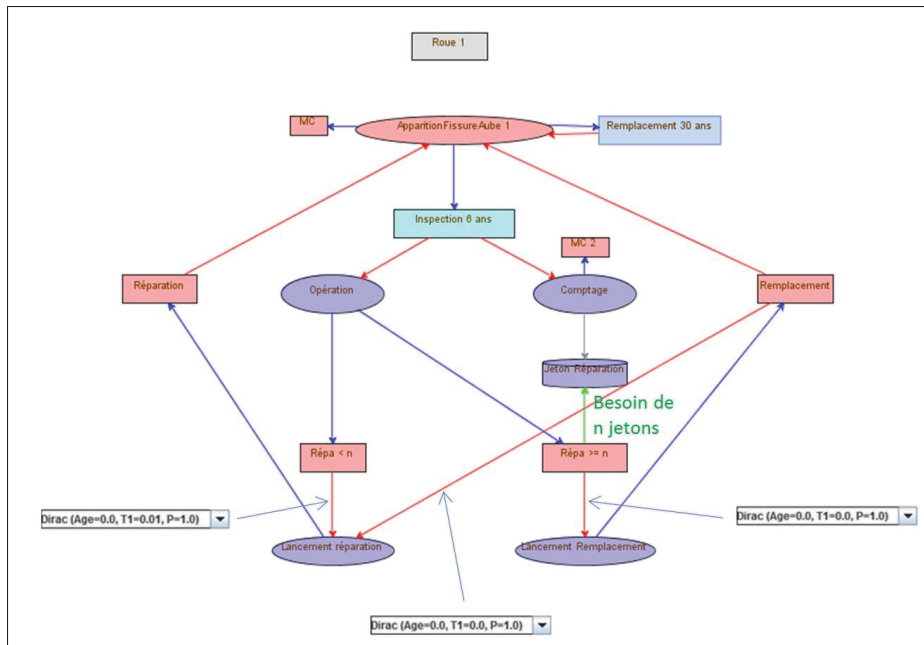


Figure 2.30 Modèle de comptage sous VME

qui vont activer certains événements. Le lien entre '*Répa < N*' et '*Lancement réparation*' est un Dirac qui se déclenche à l'instant $t = 0,01$. Ce qui signifie qu'au moment où la maintenance est réalisée, une nouvelle loi indique à l'événement que dans 0,01 unité de temps, il devra se déclencher. De son côté, la maintenance *Répa* $\geq N$ indique à lancement remplacement un Dirac qui se déclenche à l'instant initial. Ce qui a pour conséquence que le '*Lancement remplacement*' a lieu 0,01 unité de temps avant lancement réparation. Or, aussitôt que '*Lancement remplacement*' se réalise (VME l'interprète comme une panne), le bloc maintenance '*Remplacement*' est activé. Celui-ci a alors pour conséquence de modifier la loi de fissuration initiale et d'appliquer les coûts de maintenance. Mais cet événement a aussi un lien qui va agir sur l'événement '*Réparation*'. Et ce lien contient une nouvelle loi '*NULL*' qui vient effacer le Dirac établi précédemment avant que celui n'ait atteint sa valeur finale. Ainsi l'événement n'est jamais déclenché et le bloc maintenance Réparation n'est pas déclenché.

Le système de comptage créé permet d'utiliser des conditions de comparaisons numériques. Avant d'appliquer les lois réelles et à des fins de vérifications, ce modèle a été exécuté avec une loi de dégradation de type Dirac (dégradation de toutes les turbines à l'instant initial) de

telle sorte que tous les six ans un jeton soit systématiquement créé. La figure 2.31 présente les résultats obtenus.

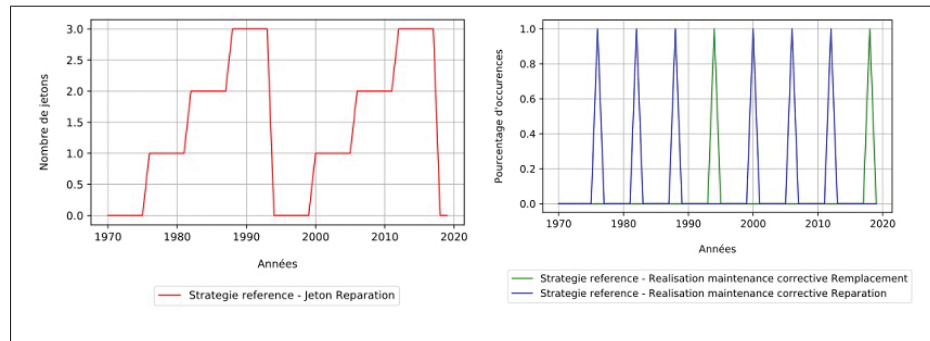


Figure 2.31 Modèle avec comptage de jetons

La figure 2.32 montre l'évolution du nombre de réparations et de remplacement pour notre modèle avec une limite de zéro réparation, puis une, puis deux avant le remplacement. Il va de soi que les coûts sont également impactés.

2.2.3.6 Sixième modèle : roue de remplacement

Le principe est similaire à celui du comptage proposé précédemment, à la différence qu'il est basé sur le nombre d'années, plutôt que sur le nombre de réparations : avant une date fixée, si lors d'une inspection un bris est constaté, une réparation est effectuée. Après la date choisie, on consulte un stock, si une roue est disponible, il y a remplacement, sinon réparation. Il est aisé de constater qu'il ne s'agit pas ici d'une simple condition comme dans le cas du comptage, mais que de la gestion de ressources intervient également (figure 2.33).

La loi '*Apparition Fissure*' reste inchangée par rapport au premier modèle simple étudié. Cependant au lieu d'avoir un unique bloc de maintenance préventive conditionnelle, il y en a deux.

Le premier bloc '*Inspection Roue Âge < A*' n'est déclenché qu'avant la date choisie et va systématiquement déclencher une réparation. Le lien entre les deux blocs est une nouvelle loi de type Dirac avec déclenchement de l'événement à l'instant initial. Le bloc maintenance correc-

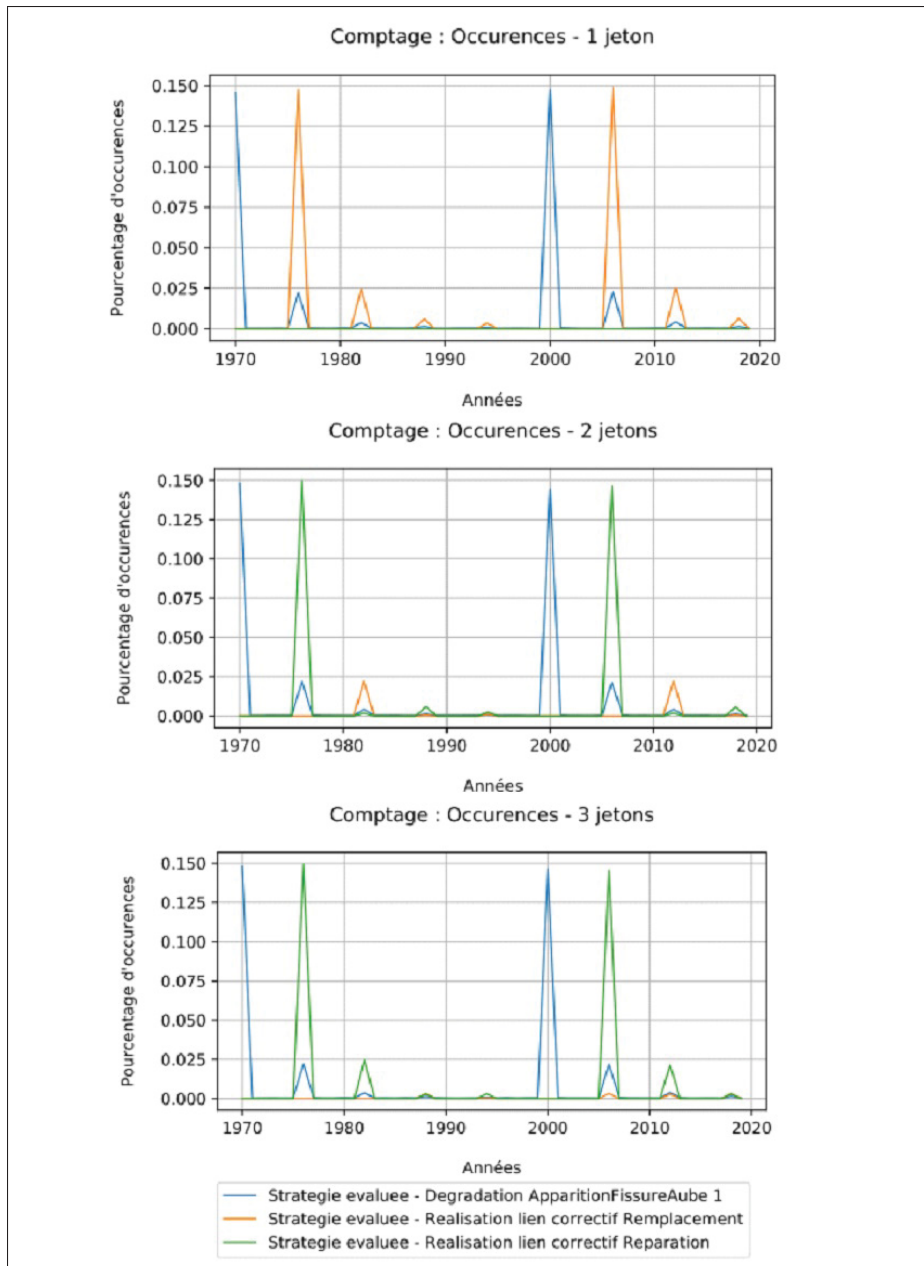


Figure 2.32 Réparations et remplacement en fonction du nombre de jetons

tive 'Réparation' est alors directement enclenché, entraînant les coûts associés à la réparation et modifiant la loi de fiabilité de 'Apparition Fissure'.

Le second bloc, '*Inspection Roue Âge > A*', pointe sur deux événements : '*Vérification Stock*' et '*Sinon réparation*'. Si le stock est vide, il n'y a pas de remplacement, et donc pas de répa-

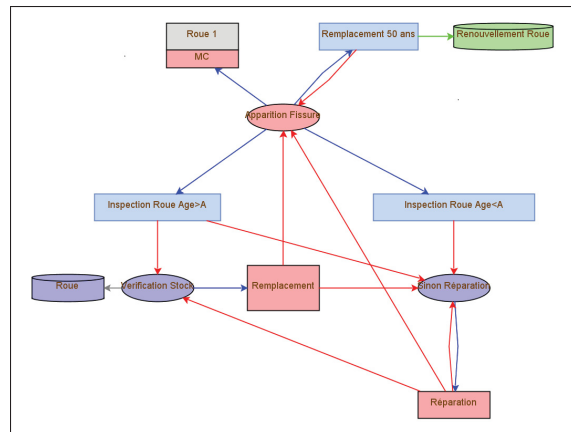


Figure 2.33 Modèle de roue de remplacement sous VME

ration. Les figures 2.34 et 2.35 représentent le fonctionnement de ce modèle dans le cas où le bris intervient à partir de l'année limite.

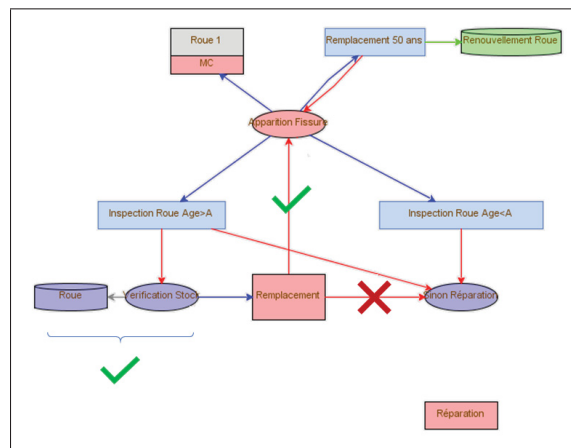


Figure 2.34 Cas avec roue en stock

2.2.3.7 Modèle complet

Après la construction séparée de ces modèles, il est temps de les assembler afin d'obtenir un modèle de fissuration et d'évaluation des scénarios complet. La description de chaque modèle ayant été faite au préalable cette partie est réservée à montrer l'évolution du modèle et sa

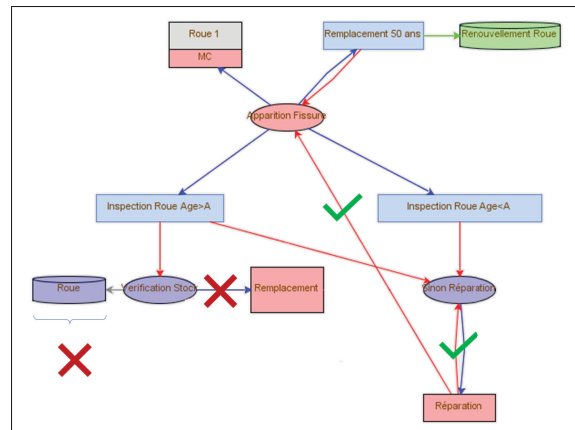


Figure 2.35 Cas sans roue en stock

conception de la version la plus simplifiée à la plus complexe. Au départ il y a le second modèle, avec cycles de réparation et remplacement, présenté figure 2.36. Auquel s'ajoute la

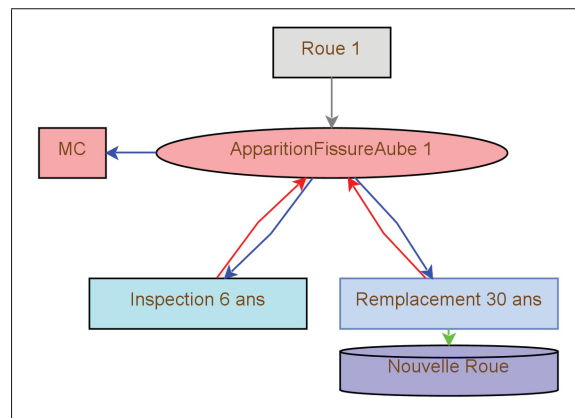


Figure 2.36 Rappel du modèle simple

séparation 'MortNe/DégradationNaturelle', figure 2.37. Puis le système de comptage, figure 2.38. Et enfin la possibilité d'une roue de remplacement, figure 2.39. Vient alors le modèle à deux aubes en séries, figure 2.40. Puis celui à 13 aubes en séries, pour un modèle complet du système, figure 2.41. Ainsi, après les assemblages successifs des divers modèles simplifiés, le modèle de fissuration qui correspond au modèle complet du système est obtenu.

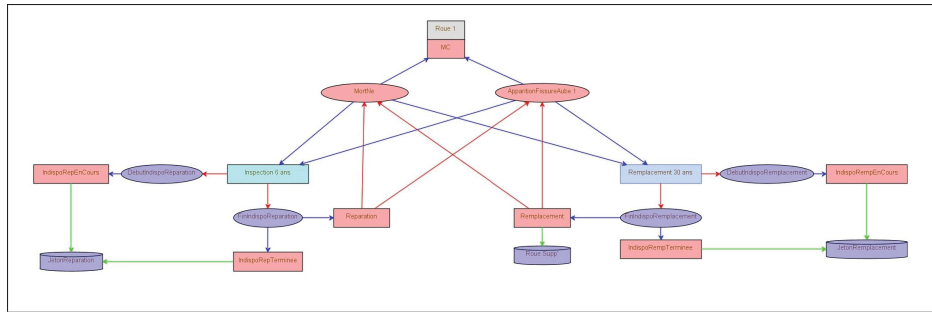


Figure 2.37 Séparation des courbes & Cycles de réparation

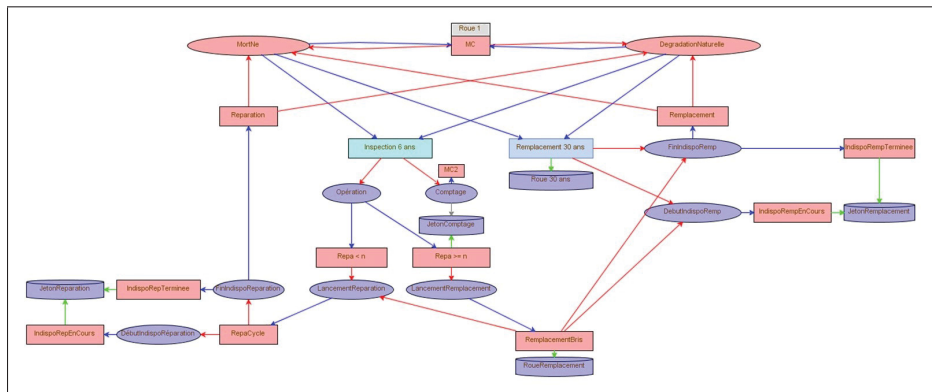


Figure 2.38 Ajout du système de comptage

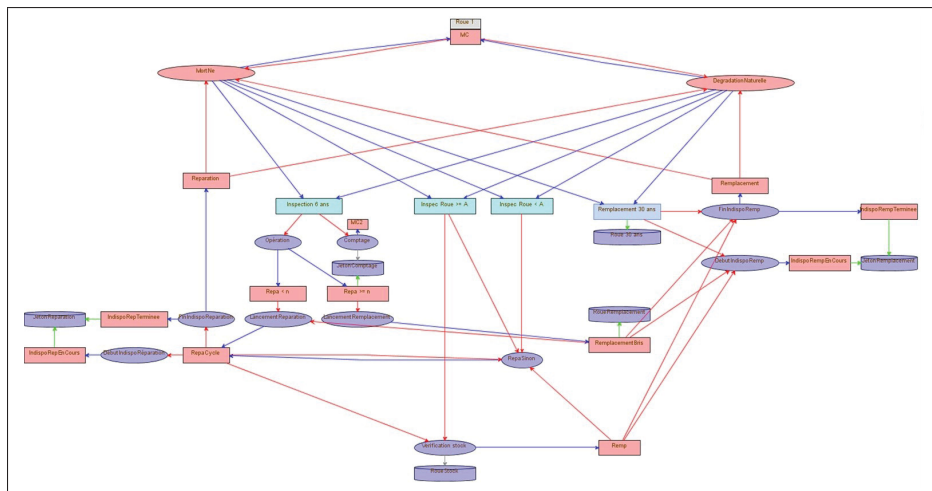


Figure 2.39 Ajout du système 'roue de remplacement'

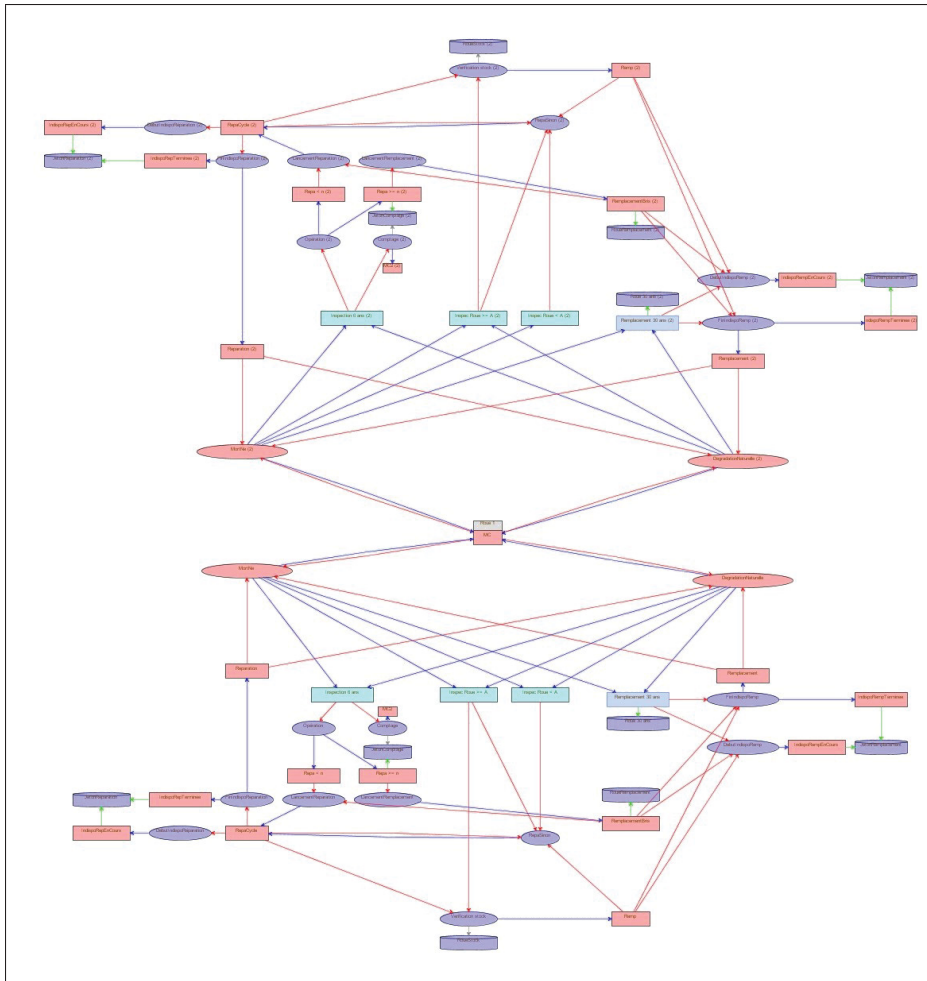


Figure 2.40 Deux aubes en séries

2.2.4 Vérification

Avant de pouvoir utiliser le modèle bâti, il faut le vérifier. En effet, le modèle étant complexe, il faut être sûr qu'il réagisse correctement aux données d'entrées. Pour cela, deux étapes : d'une part il faut vérifier que les courbes fournies par le logiciel évoluent correctement, lorsque les valeurs d'entrées sont modifiées. Pour cela il faut détailler à quoi elles correspondent et se pencher sur le nombre de bris en fonction du nombre d'aubes dégradées. D'autre part, il faut analyser les données brutes de VME (à chaque itération, l'ensemble des blocs parcouru est signalé par ordre d'activation). Cela permettra de calculer la durée moyenne entre deux bris, et à l'aide de la méthode de Kaplan-Meier de retracer les courbes de fiabilité d'une roue en

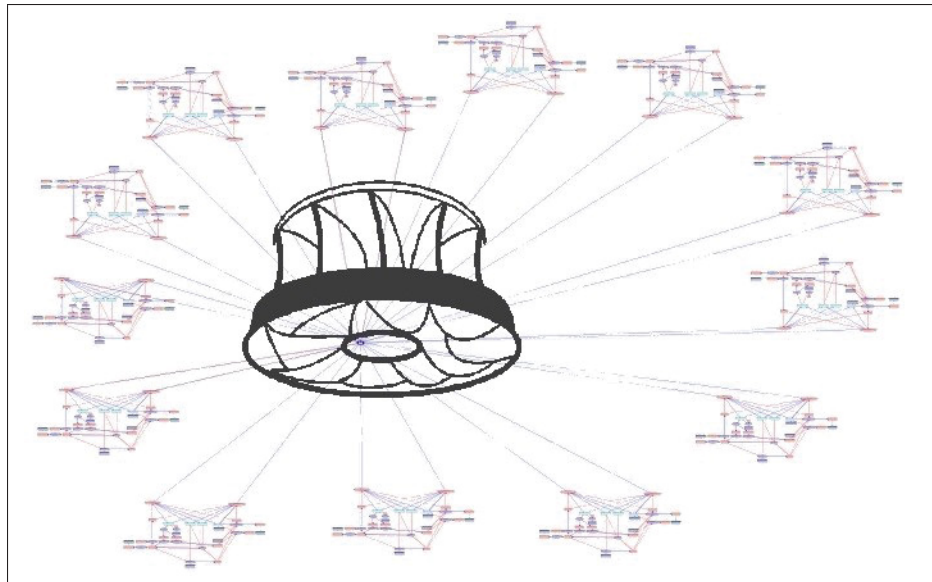


Figure 2.41 Modèle de fissuration complet

fonction du nombre d'aubes endommagées. Mais avant tout, un test de convergence reste est nécessaire. En effet puisque VME utilise un simulateur de Monte-Carlo, le nombre d'itérations est à prendre en compte est important.

2.2.4.1 Test de convergence de Monte-Carlo

La simulation de Monte-Carlo est un outil qui permet d'approcher des valeurs numériques à l'aide de techniques probabilistes (Zio, 2013). Toutefois, pour lisser le caractère aléatoire et approximer la valeur voulue, le nombre de tirages est à prendre en compte doit être assez grand pour que les résultats convergent. C'est pourquoi un test de convergence est réalisé. La métrique choisie est le nombre de bris d'une aube (aube trois du modèle), avec une aube dégradée en permanence et les 12 autres en bon fonctionnement. Les résultats sont présentés sur la figure 2.42.

Pour un faible nombre d'itérations, les valeurs sont hésitantes. Toutefois à partir de 100 000 itérations, la valeur se stabilise autour de 15,5%. Pour une variable qui représente le modèle, la convergence à lieu à partir de 100 000 itérations. Les calculs seront donc réalisés avec des

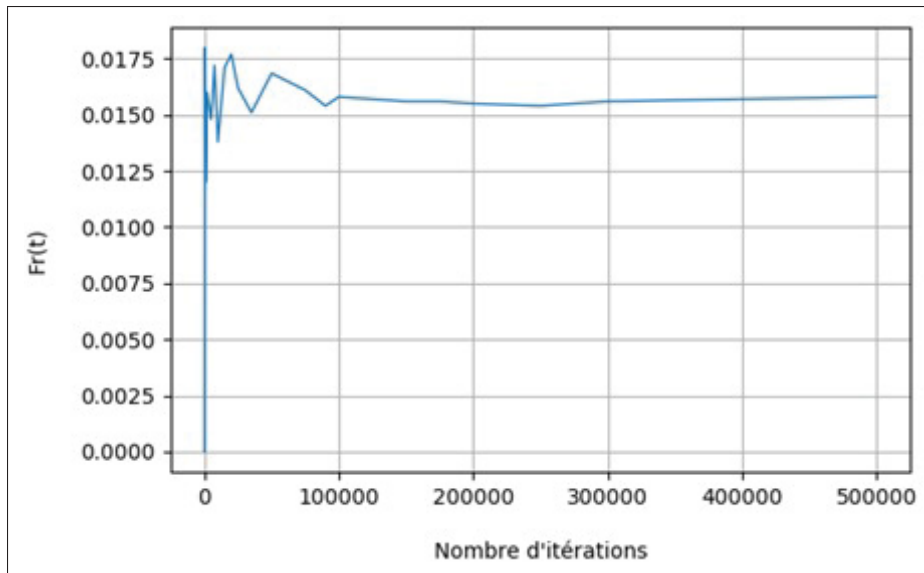


Figure 2.42 Résultats du test de convergence

simulations de $n = 200000$ itérations, ce qui assurera une marge de sécurité sans pour autant affecter les durées de calcul. Notons que le graphe représenté ici correspond à un indicateur, mais que dans un souci de rigueur, d'autres seraient à prendre en compte tels que la VAN moyenne, la dispersion de la VAN ou encore le taux de retour. En effet l'ensemble des paramètres utilisés par le gestionnaire pour prendre une décision doivent impérativement converger. Sans quoi une part du risque serait mal envisagée et les retombées économiques pourraient être très graves.

2.2.4.2 Vérification de la quantité de bris

Pour vérifier que les dégradations successives des aubes dégradent réellement notre système, les lois sont modifiées une à une sur chacune des aubes. Pour la première simulation, les 13 aubes avaient leur loi initiale, non dégradée. De même, à chaque bris, la loi de réparation associée est la loi non dégradée. Ce qui correspond à une remise à neuve de chaque aube. Chaque bris qui a lieu est alors considéré comme le premier bris d'une aube neuve. Ensuite la simulation avec la première aube qui a initialement la loi d'une aube dégradée est reproduite (figure 2.43). De même lorsqu'elle est réparée, la loi qui lui est affectée est la loi d'une aube dégradée. Les bris correspondent ici, en moyenne, à ceux d'une roue avec une aube dégradée.

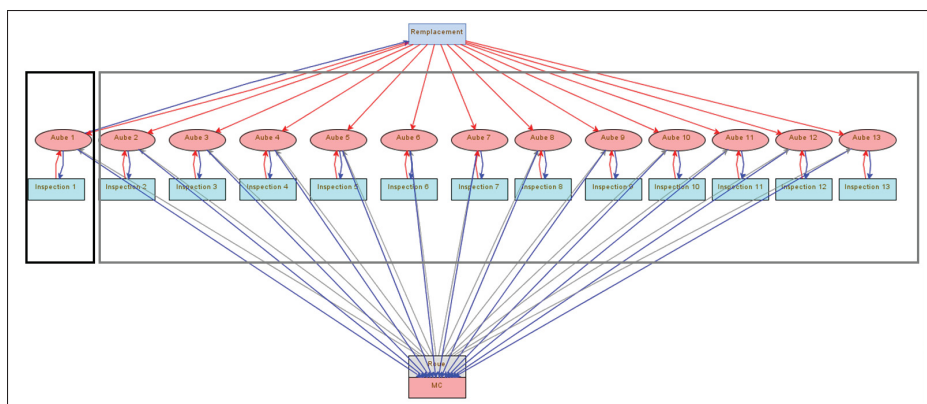


Figure 2.43 Une aube dégradée en permanence

Puis, une par une, 13 aubes sont dégradées jusqu'à ce que toutes contiennent la loi dégradée tout au long de la simulation (figure 2.44).

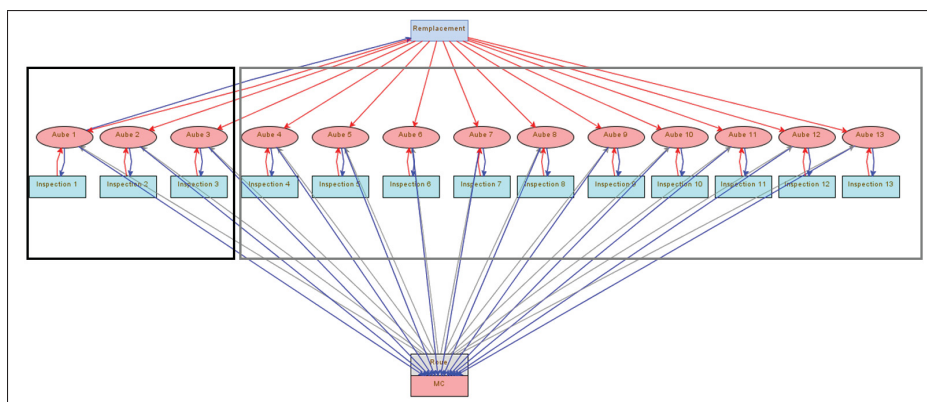


Figure 2.44 Trois aubes dégradées en permanence

À l'issue de chaque simulation, un nombre de bris par aube est obtenu, il est alors possible de sommer l'ensemble des bris sur les 13 aubes, et tracer le nombre de bris par simulation (par type de roue). Les allures semblent alors similaires, comme observé sur la figure 2.45.

En regardant de plus près les deux pics qui correspondent à la mise en service des roues et à leur réparation fictive en 2000. Les figures 2.46 et 2.47 permettent d'observer que les courbes sont positionnées dans l'ordre attendu.

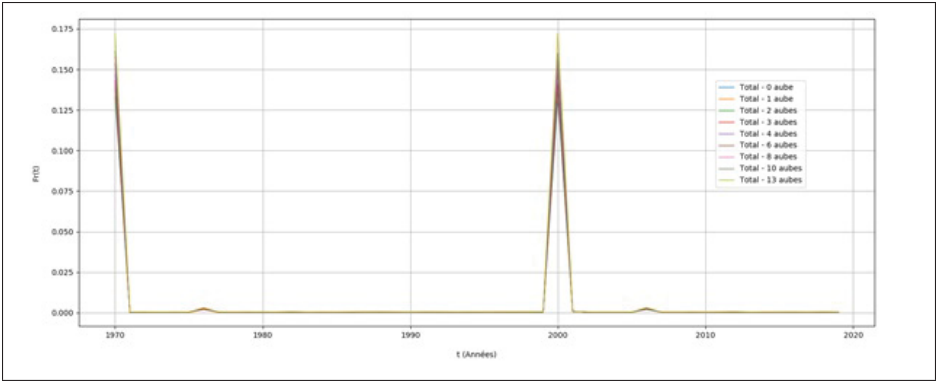


Figure 2.45 Vérification, quantité de bris - Global

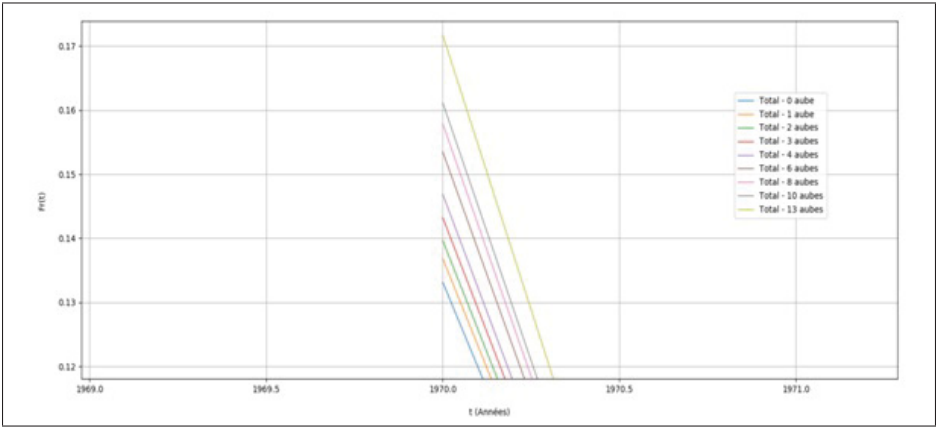


Figure 2.46 Vérification, quantité de bris - Démarrage

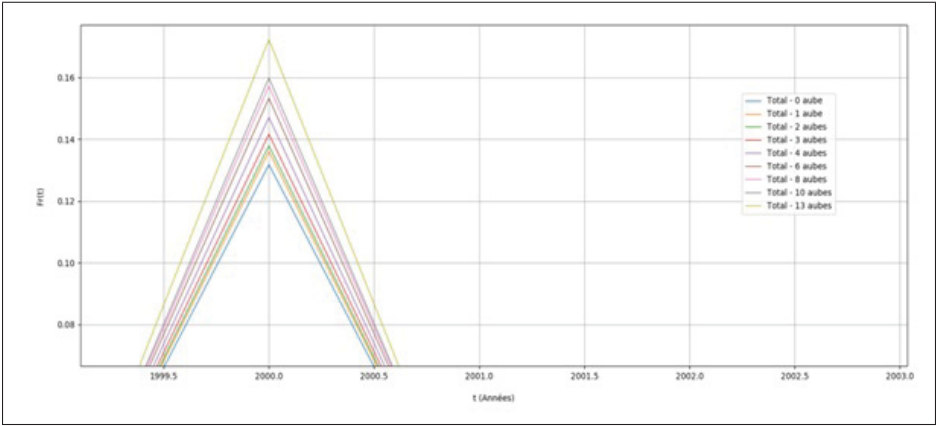


Figure 2.47 Vérification, quantité de bris - Remplacement

Le nombre de bris est donc une fonction croissante du nombre d'aubes dégradées, ce qui rend cohérent le modèle d'aubes en séries.

2.2.4.3 Vérification des courbes de défaillances

Un des estimateurs de la fonction de survie le plus utilisé lorsqu'aucune hypothèse ne peut être faite sur la distribution des temps de survie est l'estimateur de Kaplan-Meier. La fonction de survie $S(t)$ est alors définie :

$$S(t) = P(T > t) = 1 - F(t), t \geq 0 \quad (2.10)$$

Avec $F(t)$ la probabilité de bris. Soient deux durées t_1 et t_2 telles que $t_2 > t_1$, alors :

$$P(T > t) = P(T > t_2 \cap T > t_1) \quad (2.11)$$

Puisque pour survivre après t_2 il faut naturellement avoir déjà survécu au moins pendant une durée t_1 .

D'après le théorème des probabilités conditionnelles, il vient :

$$P(T > t_2) = P(T > t_2 \mid T > t_1) \cdot P(T > t_1) \quad (2.12)$$

Où le premier facteur peut être estimé par $1 - \frac{d_{t2}}{n_{t2}}$ où d_{t2} est le nombre d'individus ayant connu l'évènement en t_2 et n_{t2} le nombre d'individus qui auraient pu connaître l'évènement en question entre t_1 exclu et t_2 . En d'autres termes, n_{t2} est le nombre d'individus à risque au temps t_2 .

Donc :

$$S(t_2) = \left(1 - \frac{d_{t2}}{n_{t2}}\right) \cdot S(t_1) \quad (2.13)$$

L'équation précédente donne une récurrence permettant de calculer $S(t)$ pour tout temps d'évènement t observé sachant qu'initialement : $S(0) = 1$.

$$S(t) = \prod_{(i|t_i \leq t)} \left(1 - \frac{d_i}{n_i}\right) \quad (2.14)$$

Ici, étant donné la quantité de données obtenue en effectuant un grand nombre de simulations, il n'est pas nécessaire de traiter le cas de données censurées.

Par ailleurs, la valeur utilisée pour les courbes de fiabilité dans chaque aube est la racine 13-ème de la fiabilité globale conformément à la méthode présentée en partie **2.1.3.1**.

2.3 Conclusion

La fissuration est due à la propagation de défauts et à plusieurs types de cycles de contraintes. Il existe des critères fixant des seuils à partir desquels ces défauts se propagent. Le diagramme de Kitagawa est un outil permettant de le comprendre facilement. À partir de ce seuil, de la taille et de la nature des défauts, il est possible de formaliser des lois de fiabilité. Ces lois probabilistes servent ensuite d'intrants à VME, outil de gestion d'actifs développé par les équipes d'EDF R&D. Celui-ci permet d'évaluer les coûts des stratégies de maintenances en prenant en compte différents aspects physiques assez complexes.

Le logiciel se veut expert et l'utilisation dérivée de certains blocs semble être une de ses forces. Si cela complexifie l'interface usager, il semblerait que cette utilisation dérivée permette également de modéliser des situations pour lequel il n'est pas initialement prévu. Bien qu'originellement conçu pour les stratégies de maintenances dans le domaine nucléaire, VME semble être un outil adaptable. L'aspect simulation de Monte-Carlo permet de prendre en compte le fait que les pannes sont des éléments probabilistes et de s'affranchir de modèles numériques complexes. Comme pour toute simulation de Monte-Carlo, le nombre de simulations nécessaire a été déterminé à l'aide d'un test de convergence.

Un premier modèle de fissuration de roues de turbines a été mis au point à l'aide de VME. La fréquence d'inspection, le phénomène de mort-né et de vieillissement en fonction des réparations sont les principaux éléments implémentés dans ce modèle complexe de la roue de turbine.

Après un modèle global de la roue, c'est un système se composant de 13 aubes en séries qui a été élaboré. Celui-ci a été vérifié en suivant la méthode de Kaplan-Meyer. Il a permis de gagner en précision sur la physique de la fissuration et donc sur les conséquences financières, permettant des études plus fiables.

Toutefois, certaines limites apparaissent : la fissuration a été revue en une simplification en deux simples lois linéaires à deux paramètres. De même certaines données économiques n'étant actuellement pas disponibles pour cette étude. Certaines valeurs telles que la pénalité de non-inspection ont dû être choisies de manière arbitraire, menant à des résultats non significatifs. Ainsi, le modèle est établi, mais les données, relatives à chaque étude seront à compléter au fur et à mesure des besoins futurs.

CHAPITRE 3

MODÈLE DE CAVITATION

Dans le chapitre précédent c'est le phénomène de fissuration qui a été présenté puis établi sous VME permettant d'obtenir des informations sur les stratégies de réparation. Ce chapitre est dédié au second mode de dégradation identifié qu'est la cavitation. De la même manière, le chapitre est séparé en deux parties : une revue de littérature introduit le phénomène physique, puis après hypothèses et simplification - tout en restant le plus fidèle possible à la réalité - un modèle simple est proposé sous VME. C'est alors les limites du modèle et de VME qui sont abordées lors de la présentation des résultats obtenus.

3.1 Revue de littérature

L'érosion des turbines hydrauliques due à la cavitation est un phénomène qui entraîne des arrêts de groupes et des réparations coûteuses. Très différente de la fissuration, dans cette première partie nous nous attacherons à décrire la physique de la cavitation, les conséquences qu'elle peut avoir sur un parc hydraulique et quels sont les enjeux actuels de ce phénomène de dégradation.

3.1.1 Le phénomène de cavitation

La cavitation est un phénomène physique engendré par le changement d'état isotherme de l'eau. (Franc *et al.*, 1995) la définit comme « la rupture du milieu continu de liquide sous l'effet de contraintes excessives ». Alors que le changement d'état de l'eau a usuellement lieu par élévation de température, c'est ici une variation de pression qui conduit au passage de l'état liquide à l'état vapeur, comme illustré à la figure 3.1.

Ainsi la cavitation s'oppose à l'ébullition qui est un phénomène isobare et se produit par élèvement de la température. Pour les turbines hydrauliques, la variation du champ de pression aux abords des aubes va générer en premier lieu la création d'une bulle de vapeur. Ce change-

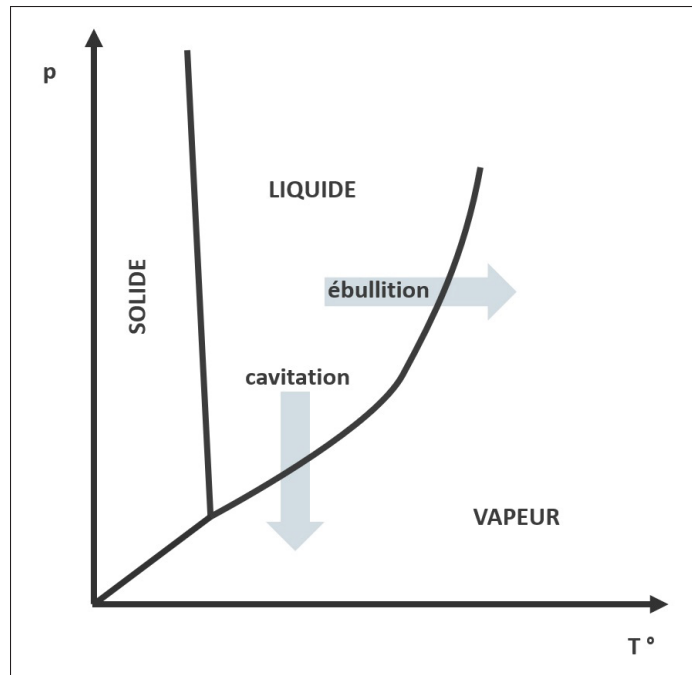


Figure 3.1 Diagramme d'état de l'eau

ment de pression est dû à la variation de la vitesse de l'eau dans la turbine. En effet, d'après le théorème de Bernoulli :

$$\frac{v^2}{2} + g \cdot z + \frac{P}{\rho} = \text{constante} \quad (3.1)$$

Ainsi la pression globale étant constante, c'est la variation de vitesse qui entraîne une variation de pression. Dans un second temps, lorsque la pression réaugmente, au contact de l'aube, l'effet inverse se produit et la bulle de gaz implose dans un jet d'eau liquide à haute pression. L'énergie libérée à cet instant produit alors une onde de choc qui heurte la paroi de l'aube. C'est cette onde de choc qui, répétée, érode l'aube de la turbine, arrachant peu à peu des portions de métal.

3.1.1.1 Les conséquences de la cavitation

Peu à peu la cavitation s'accumule et vient éroder les parois de la turbine (figure 3.2) entraînant une modification du profil hydraulique entre les aubes. Ces modifications ont alors un impact

sur les performances de la turbine. Bien que l'on ne sache actuellement pas le quantifier, la cavitation augmente la rugosité et entraîne une augmentation des pertes. Par ailleurs, la modification géométrique du profil peut alors entraîner une modification des zones de cavitation et ainsi amplifier le phénomène (Boson-Clermont, 2015). Les réparations effectuées lors des arrêts engendrent elles-mêmes de l'incertitude. Les imperfections liées aux réparations sont inévitables et peuvent se traduire par un meulage approximatif des surfaces, des porosités liées au soudage, des épaisseurs qui varient et des profils imparfaits. En effet lors des réparations, effectuées directement en centrales, la reconstitution des profils n'est pas identique aux profils neufs d'origine.

Enfin, l'érosion étant un phénomène aléatoire, elle n'est pas parfaitement identique sur l'ensemble des aubes. Ainsi au cours des années, même si les schémas de dégradations sont similaires, les aubes se trouvent être dégradées différemment et la quantité de matière arrachée n'est pas également répartie sur la roue. Apparaissent alors des phénomènes de balourd mécanique. La roue en opération est peu alors engendrer une dégradation accélérer sur elle-même, mais aussi sur le reste des composantes adjacentes par de nouvelles vibrations qui apparaissent au cours du temps. Ces vibrations sont ensuite susceptibles d'interférer avec le balourd hydraulique de l'installation et d'en modifier le champ de pression. Ce qui là encore vient modifier les zones cavitantes et l'intensité de cavitation.

3.1.1.2 Éviter la cavitation

Lorsque les fabricants livrent les roues de turbines, celles-ci sont supposées ne pas caviter dans une plage d'opération prédéterminée. Toutefois afin d'optimiser l'interpolation sur l'ensemble du parc, l'exploitant ne respecte pas toujours ces plages.

3.1.1.3 Les enjeux actuels

À l'heure actuelle, les notions de mécanique des fluides et la puissance de calcul des ordinateurs ne sont toujours pas suffisantes pour permettre une estimation quantitative de la cavitation

(Peters *et al.*, 2015; Zhang & Zhang, 2013). Les modèles permettent d'estimer quelles seront les zones cavitantes d'une roue, mais ne sont pas toujours capables de prévoir l'intensité de cavitation efficacement afin de prédire la quantité de matière dégradée.

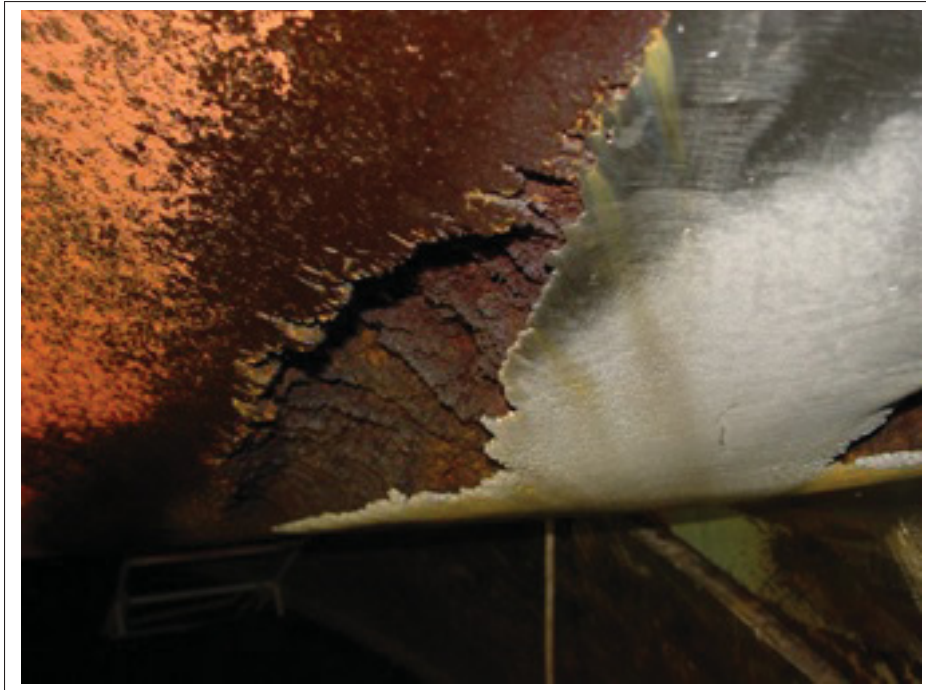


Figure 3.2 Photo d'une aube érodée par cavitation

Cependant cette information est très utile pour les exploitants. En effet, connaître la quantité de matière arrachée au cours du temps pourrait mener à des stratégies préventives de réparation. Chez Hydro-Québec, des recherches sont effectuées afin d'approximer au mieux cette information sans faire d'inspection. Notamment à la baie James des groupes sont équipés de systèmes pour estimer la perte de masse causée par la cavitation en corrélant les vibrations dans la roue et l'intensité de cavitation (Lafleur, 2012).

3.1.2 Les types de cavitation

La cavitation apparaît dans différents cas d'opération (figure 3.3). Elle se manifeste alors différemment et avec une agressivité variable (Bourdon, 2000).

3.1.2.1 Cavitation d'entrée

La cavitation d'entrée se présente sous forme d'une poche de vapeur souvent située au niveau du bord d'attaque au niveau du croisement entre l'aube et la ceinture. Cette poche instable libère des tourbillons de vapeur dans l'écoulement qui viennent ensuite imploser contre les aubes. Au moment de l'implosion de ces bulles, une onde de choc est émise et projette des petits jets d'eau contre la paroi de la roue, engendrant alors l'arrachement de matière. Il s'agit du processus de cavitation le plus intense.

3.1.2.2 Cavitation de sortie

La cavitation de sortie (aussi appelée à bulles séparées) se retrouve près des canaux interaubes et est liée à la pression statique en sortie de roue. Elle n'engendre que peu de dommages, surtout pour les machines de basses chutes. Généralement cette cavitation se présente en plus de la cavitation d'entrée et est bien moins agressive. Elle n'est donc pas un critère dimensionnant.

3.1.2.3 Torche

Elle apparaît au sein de l'écoulement de sortie et se présente sous la forme d'une torche de vapeur. On la retrouve généralement du moyeu de la roue jusqu'à l'axe du diffuseur. Son volume est largement influencé par le nombre de Thoma ou nombre de cavitation, défini comme suit et noté sigma :

$$\sigma = \frac{\rho - \rho_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2} \quad (3.2)$$

Ce nombre est un paramètre dimensionnant lors de la conception de la roue. Tout comme la cavitation de sortie, la torche ne provoque que peu d'érosion et consiste surtout en un phénomène qui a lieu dans la turbine, mais sans réel impact sur l'érosion.

3.1.2.4 Cavitation de recirculation

Ce type de cavitation se présente essentiellement à faible charge. Elle se manifeste sous forme de tourbillons de vapeurs accrochés au plafond de la roue. Elle provoque des dommages au niveau de la couronne, du côté intrados. Toutefois, comme elle n'apparaît qu'à faible charge, la majorité du temps d'exploitation, ce type de cavitation n'est pas actif.

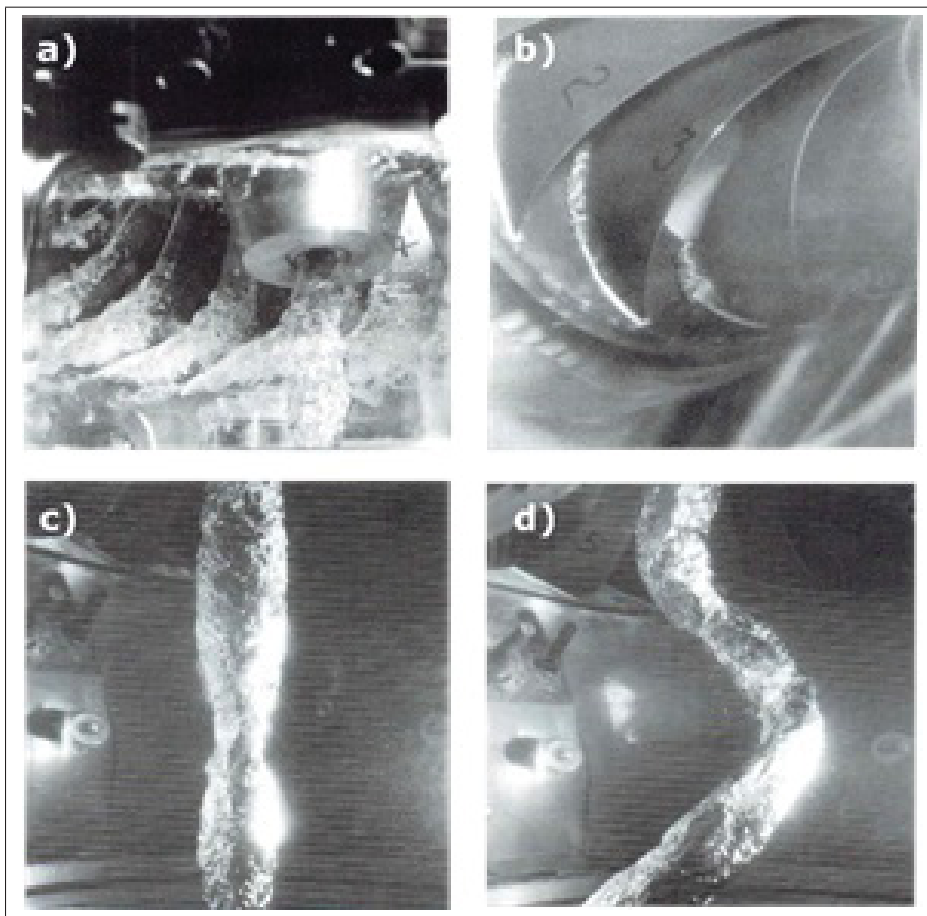


Figure 3.3 Modes principaux de cavitation rencontrés sur les turbines Francis : a) d'entrée, b) de sortie, c) en torche à débit partiel, d) en torche en surdébit

3.1.2.5 Conclusion

D'autres phénomènes de cavitation peuvent se présenter comme les tourbillons de Von Karman qui se retrouvent à la sortie de l'aube. Mais ils sont toutefois beaucoup plus rares et relativement faibles. Ainsi parmi les différents types de cavitations observables, c'est la cavitation d'entrée qui, du point de vue érosif, est la plus importante.

3.1.3 Approche expérimentale

La cavitation est encore très mal appréhendée en centrale. En effet, il est difficile d'équiper les turbines pour des mesures étant données les contraintes. (Escaler *et al.*, 2006) ont proposé des techniques de mesure par écoute vibratoire pour estimer la cavitation. Les mesures sont réalisées au niveau du palier guide. Ensuite, pour obtenir une image de la cavitation au niveau de la roue il reste à déterminer une fonction de transfert entre le palier et l'aube. Pour calibrer le modèle ainsi obtenu, une mesure réelle de la cavitation est effectuée.

Toutefois, comme expliqué précédemment, les enjeux sont importants. Des études sont donc en cours afin de prédire toujours mieux quel sera le volume de cavitation lors de la prochaine inspection. Pour étudier la cavitation et en comprendre les dessous, deux systèmes de mesures ont été développés à l'IREQ : un banc d'essai de cavitation vibratoire et le CaviJet.

3.1.3.1 Essais avec le banc de cavitation vibratoire

Il s'agit d'un cône vibrant qui en translatant modifie localement la pression de l'eau et engendre la cavitation (figure 3.4). La cavitation générée ici est peu intense et la durée des essais peut s'étendre jusqu'à une quinzaine d'heures. La vitesse de dégradation relativement faible de ce type d'essai permet de statuer sur les étapes de la cavitation (voir prochain chapitre). Lors de l'essai, c'est un total de 15 mesures qui sont effectuées afin d'évaluer la perte de masse au cours du temps.

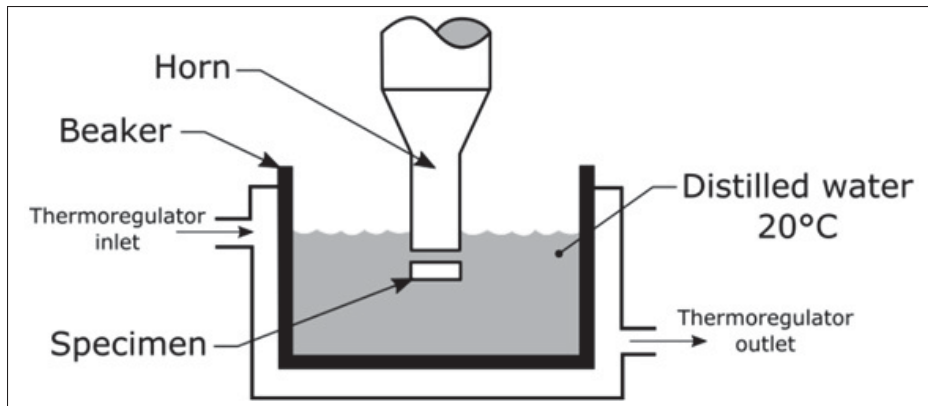


Figure 3.4 Schéma du banc d'essai de cavitation vibratoire

3.1.3.2 Le CaviJet

Le CaviJet est un dispositif expérimental mis au point à l'IREQ qui met sous pression un jet d'eau ensuite dirigé dans une buse conique en dessous de laquelle se situe l'échantillon. La cavitation y est intense en conséquence de quoi un essai dure environ trois heures. Chaque essai est interrompu entre trois et cinq fois pour assurer le relevé des pertes de masses. La figure 3.5 schématise le fonctionnement du CaviJet.

3.1.3.3 Limite des résultats obtenus

Ces essais pratiqués en laboratoire ont l'avantage de fournir de l'information sur l'évolution du matériau au cours du temps lorsqu'il est soumis à de la cavitation. Malheureusement, ils sont relativement axés sur l'aspect sciences des matériaux et le lien avec les prédictions sur turbines en centrales est parfois très étroit. C'est plutôt l'aspect résistance des matériaux qui est étudié au travers de ces installations. De ce fait, il est possible de faire des inférences pour proposer des campagnes de mesures sur les turbines réelles, mais les résultats obtenus sur ces deux dispositifs sont à prendre avec recul pour l'instant quant au comportement des roues de turbines en centrale.

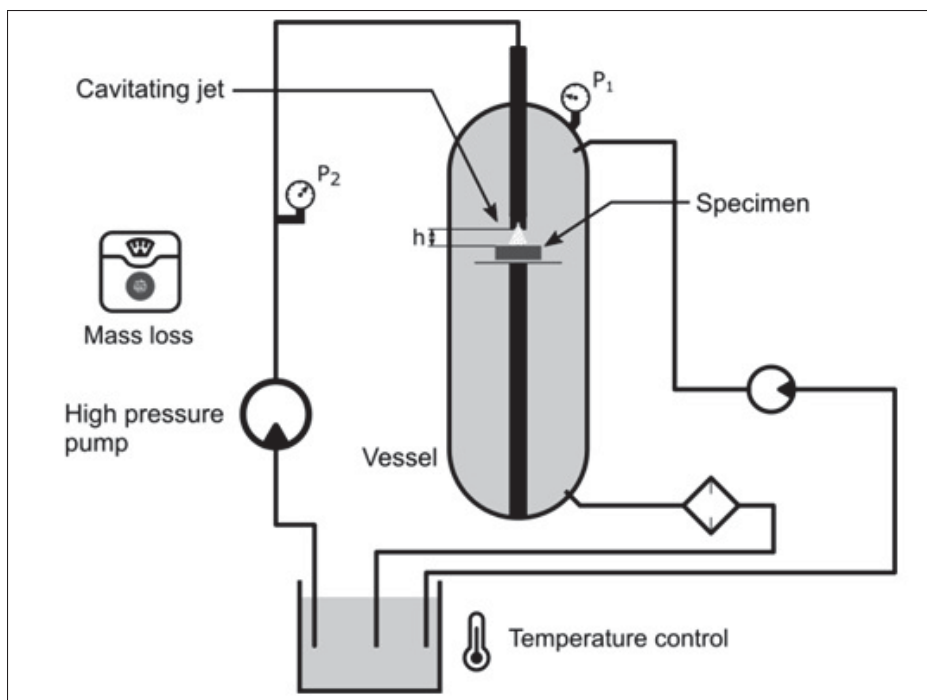


Figure 3.5 Schéma du CaviJet

3.2 Réalisation du modèle

Cette partie est destinée à décrire la réalisation du modèle de cavitation en fonction de ce qui a été présenté précédemment. Pour commencer, puisqu'il s'agit ici d'un second mode de dégradation étudié, afin d'éviter toute confusion les différences principales entre fissurations et cavitations sont explicitées. Ensuite le modèle de cavitation est présenté sous une approche relativement simple afin de s'adapter à VME tout en satisfaisant les contraintes et attentes des experts. La réalité technico-économique étant relativement complexe vis-à-vis des capacités de VME c'est finalement des pistes d'évolutions qui sont suggérées en accord avec les propositions de modifications de la part des équipes d'EDF R&D.

3.2.1 Différences fondamentales avec la fissuration

La fissuration est un phénomène physique complexe dû à la présence initiale de défauts dans le matériau. Ces défauts ne sont pas observables jusqu'à ce qu'ils se propagent dans le matériau.

Une fois la propagation réalisée, la fissure est présente et il faut la réparer. La propagation étant excessivement soudaine et rapide, la fissure n'est observable qu'à partir d'un certain seuil de dégradation. Et ce seuil de dégradation atteint, les dommages sont tellement importants qu'une réparation est nécessaire dès l'observation. La particularité de ce type de dégradation est qu'une turbine inspectée et sans défaut apparent est susceptible de briser à l'instant suivant de manière irréversible, nécessitant alors une réparation.

La cavitation quant à elle est un phénomène croissant au cours du temps qui apparaît peu à peu. Lors de la mise en service d'une turbine pour la première fois, l'exploitant s'attend à de la cavitation : à l'inspection suivante, il sera normal d'avoir des pertes de matière. Toutefois les pertes d'une année sur l'autre étant faible, cela n'endommage pas le fonctionnement de la machine. Ainsi une turbine légèrement dégradée ne nécessite pas nécessairement de réparation immédiate. Les réparations étant longues et générant des frais importants, il est parfois judicieux de relancer une turbine plusieurs années avant d'intervenir et combler les trous dus à la matière arrachée. Un des objectifs de cette analyse technico-économique est notamment d'évaluer le coût de l'augmentation ou de la diminution de la fréquence d'inspection.

Ainsi dans le cadre des aubes de turbines la fissuration est non observable en dessous d'un seuil d'acceptabilité tandis que la cavitation est observable jusqu'à un seuil d'acceptabilité. Le terme « observable » est toutefois à relativiser puisqu'il fait référence à ce qui est détectable lors des inspections qui peuvent être une fois tous les six ans.

3.2.2 Création d'un modèle simple de cavitation

Après avoir consulté des experts en cavitation de l'IREQ, l'hypothèse suivie ici sera d'approximer l'érosion par cavitation de façon linéaire. À partir du moment où la surface écrouie perd de la matière, le nombre de *kg/an* de matière arrachée est constant. Compte tenu des connaissances actuelles, il s'agit là d'une approximation raisonnable.

Par ailleurs, il existe une phase d'initiation où le matériau subit les premières contraintes liées à la cavitation sans perdre de matière. Avant que l'arrachement de matière ne commence, c'est

un écrouissage pré-érosion qui a lieu, modifiant les caractéristiques mécaniques de la turbine à sa surface. Cependant le cela n'est pas observable sur les turbines en centrales avec les intervalles d'inspection actuels, mais seulement sur les essais expérimentaux. Cela provient du fait que les premières inspections n'ont lieu qu'après un certain nombre d'années. Cette période de transition étant relativement courte, l'érosion a systématiquement commencé lors des inspections. Toutefois elle sera prise en compte dans le modèle suivant. Cela permettra de quantifier la valeur de cette information : quel serait le gain économique de connaître cette valeur et de potentiellement concentrer les efforts de recherche à la diminuer ?

Ainsi, comme présenté à la figure 3.6, le premier modèle de cavitation utilisé se composera de deux droites. Celles-ci correspondent à deux phases linéaires d'arrachement de matière, dont la première a un coefficient directeur nul (pas d'arrachement de matière au cours du temps). Soit t_c le temps à partir duquel l'érosion débute, le modèle se présente donc de la forme suivante :

- Une première partie d'écrouissage : pas d'arrachement de matière de t à t_c .
- Une seconde partie érosive : arrachement de matière à partir de t_c .

$$Q_{MAT} = \begin{cases} 0 & \text{si } t < t_c \\ a \cdot t + b & \text{si } t > t_c \end{cases} \quad (3.3)$$

Avec Q_{MAT} la quantité de matière arrachée au cours du temps.

Ce modèle fait donc intervenir deux paramètres a et b . Le premier, a est le coefficient directeur de la seconde portion de droite, il traduit la quantité de matière perdue par an. Ainsi plus a est grand, plus la turbine sera rapidement érodée. Le second, b est l'ordonnée à l'origine de la seconde portion de droite. Toutefois l'ordonnée à l'origine n'a ici pas de réel sens physique. Il s'agit en fait de définir l'intersection entre les deux droites (1) et (2) et donc plus précisément la valeur de t_c . Finalement cela implique que pour un t_c donné, b est fixé. Les deux paramètres entrants en compte dans ce modèle sont donc la durée de la période de non-érosion et ensuite la vitesse d'érosion des turbines. Toutefois la réalité physique étant complexe, ces deux paramètres sont accompagnés d'incertitudes. Ces incertitudes traduisent finalement la longueur du

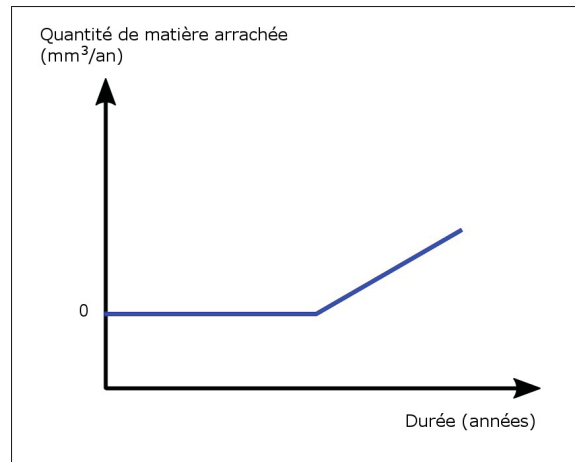


Figure 3.6 Modèle simplifié de l'arrachement de matière

premier segment de droite et l'inclinaison de la pente de la seconde droite comme le montre la figure 3.7.

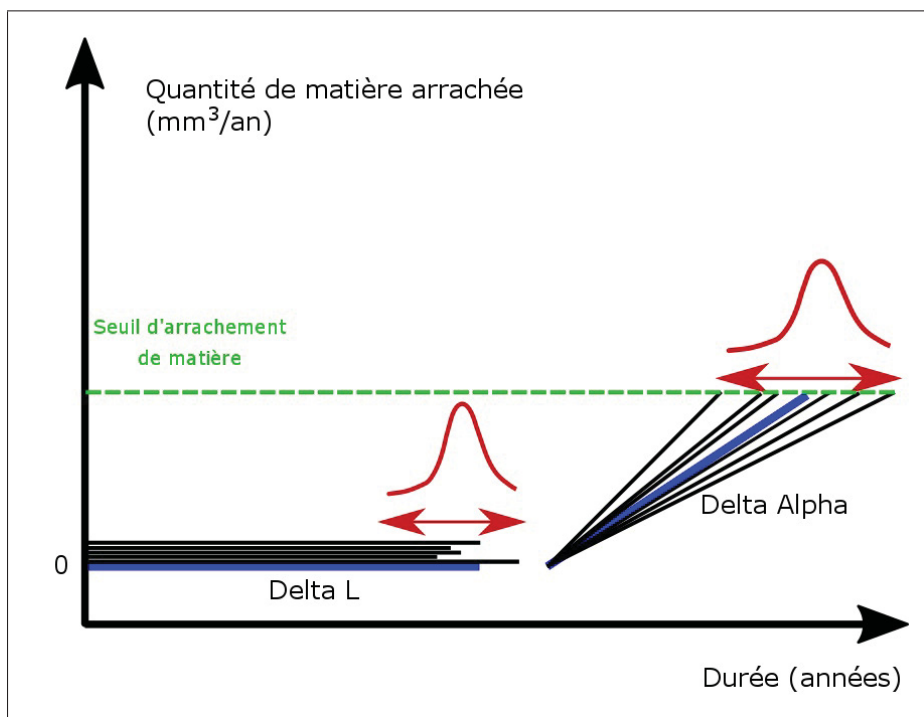


Figure 3.7 Incertitudes sur les paramètres du modèle simplifié de cavitation

3.2.3 La réalité technico-économique du modèle

Nous venons de voir la mathématique du modèle proposé. La partie suivante se propose d'y associer la partie économique et de quantifier les paramètres présentés.

3.2.3.1 Quantité de matière arrachée au cours du temps

Le modèle simplifié de cavitation dépend de deux paramètres : la durée pré-érosion et l'intensité de cavitation. Soient t_1 et c_1 ces deux variables aléatoires (figure 3.8).

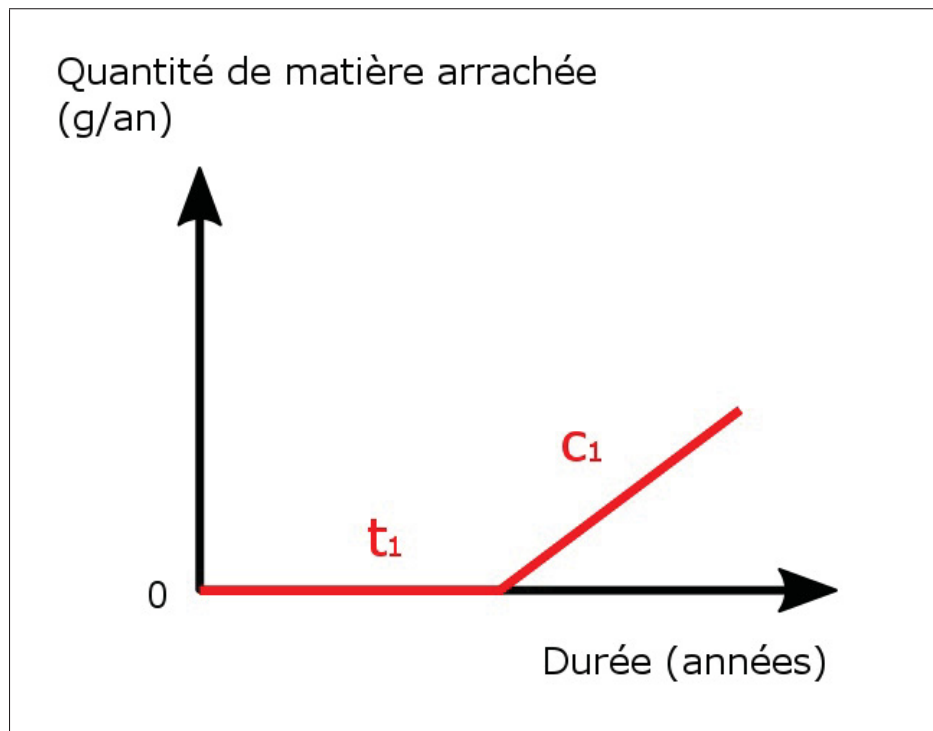


Figure 3.8 Quantité de matière arrachée au cours du temps

Comme défini précédemment :

$$Q_{mat}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < t_1 \\ c_1 \cdot t + b & \text{si } t > t_1 \end{cases} \quad (3.4)$$

Sachant que par définition t_1 est l'instant où $Q_{mat} = 0$, on en déduit $b = -c_1 \cdot t_1$

Par conséquent la formulation de la quantité de matière arrachée au cours du temps est :

$$Q_{mat}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < t_1 \\ c_1 \cdot (t - t_1) & \text{si } t > t_1 \end{cases} \quad (3.5)$$

Cependant dans le cadre de l'analyse technico-économique, la quantité d'intérêt n'est pas la quantité de matière arrachée, mais la valeur économique associée.

3.2.3.2 Coût unitaire de la matière arrachée

Lors d'une réparation de cavitation, les coûts sont liés à la dimension de la cavité à combler. En effet, plus il y a de matière arrachée, plus il faudra de matériau pour combler le trou et de temps-homme. De plus, ce temps se traduit en pertes de non-production. Ainsi une partie des frais est directement liée à la quantité de matière arrachée. Une autre partie est due à l'installation de la plateforme à installer pour la réparation, il s'agit là de frais fixes indépendants de la dimension de la cavité (figure 3.9). Ainsi le coût global d'un kilogramme de matière (\$/kg) peut être défini comme la somme de ces coûts.

Soit :

$$C_G(Q_{mat}) = C_{NP}(Q_{mat}) + C_M(Q_{mat}) + C_T(Q_{mat}) + C_{FF} \quad (3.6)$$

Avec :

- $C_G(Q_{mat})$: Coût global de la réparation en fonction de la quantité de matière arrachée (\$).
- $C_{NP}(Q_{mat})$: Coût de non-production de la turbine (\$).
- $C_M(Q_{mat})$: Coût des matériaux de réparation (\$).
- $C_T(Q_{mat})$: Coût du travail, de la main-d'œuvre (\$).
- C_{FF} : Coût des frais fixes (\$).

L'hypothèse est faite que les coûts C_{NP} , C_M et C_T sont des fonctions linéaires de la quantité de matière arrachée de la forme $C_{(x,i)} = \alpha_i \cdot Q_{mat}$

Ainsi, la fonction de coût est une fonction affine :

$$C_G(Q_{mat}) = \left(\sum_i \alpha_i \right) \cdot Q_{mat} + C_{FF} \quad (3.7)$$

Où les α_i représentent les divers coefficients directeurs des divers coûts en fonction de la quantité de matière arrachée.

Soit $A = \sum_i \alpha_i$ et $B = C_{FF}$, alors :

$$C_G(Q_{mat}) = A \cdot Q_{mat} + B \quad (3.8)$$

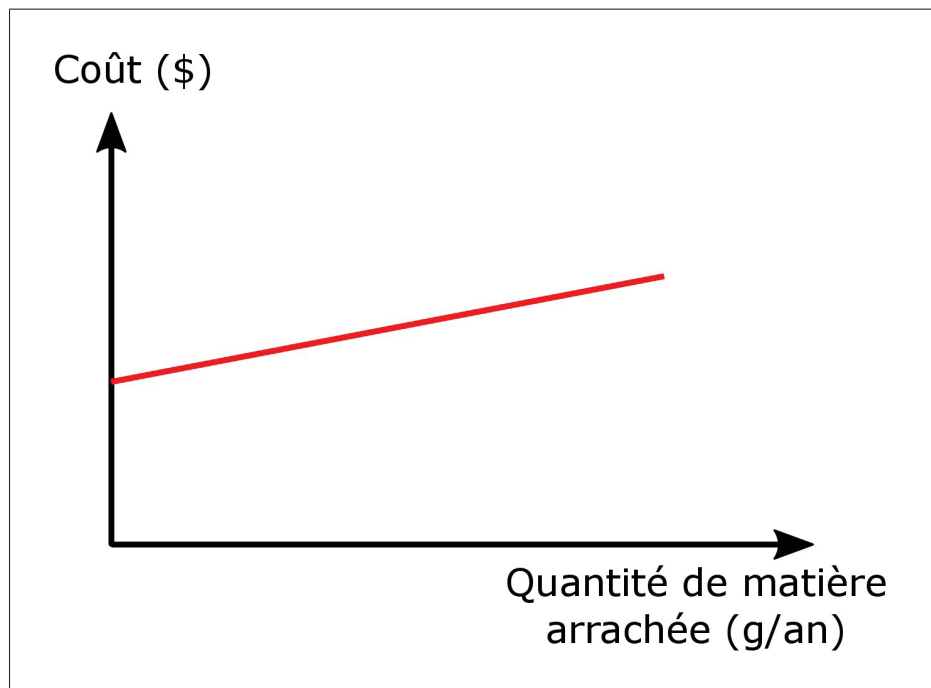


Figure 3.9 Coût en fonction de la matière arrachée

3.2.3.3 Coût de réparation à l'instant t

Ainsi le modèle de la quantité de matière arrachée au cours du temps et le modèle du coût de la réparation sont deux modèles affines. La valeur intéressante et qu'il va falloir calculer sous VME est la combinaison des deux, à savoir le coût de la réparation en fonction du temps.

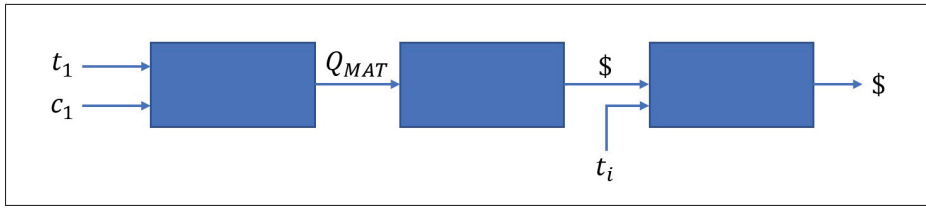


Figure 3.10 Schéma bloc du calcul du coût lors d'une inspection

Ces deux modèles affines seront combinés, ce qui donnera une réponse affine (figure 3.10).

$$C_{\$}(Q_{mat}) = A \cdot Q_{mat} + B \quad (3.9)$$

Soit :

$$C_{\$}(t) = A \cdot Q_{mat}(t) + B \quad (3.10)$$

Et :

$$C_{\$}(t) = \begin{cases} A \cdot [0] + B & \text{si } t < t_1 \\ A \cdot [c_1 \cdot (t - t_1)] + B & \text{si } t > t_1 \end{cases} \quad (3.11)$$

Le coût de réparation au cours du temps pour le modèle défini est donc fonction de trois paramètres : t , t_1 & c_1 .

$$C_{\$}(t, t_1, c_1) = \begin{cases} B & \text{si } t < t_1 \\ A \cdot c_1 \cdot (t - t_1) + B & \text{si } t > t_1 \end{cases} \quad (3.12)$$

3.2.3.4 Influence de la maintenance

La stratégie de maintenance pour la cavitation et ses conséquences sont simples. Lorsqu'une inspection a lieu, la quantité de matière arrachée est évaluée. Au-dessus d'un certain seuil, des réparations sont effectuées. En dessous de ce seuil, la roue peut continuer à tourner sans crainte. Le rendement de la machine est probablement affecté, même si nous ne sommes pas encore en mesure de l'observer expérimentalement. La réparation a lieu sur place, une plateforme de réparation est montée, un soudeur vient polir la surface puis souder du métal à la surface de la roue de turbine. Étant donné les conditions de réparations, il n'est pas possible de réaliser un traitement thermique sur les roues réparées. Pour cela, il faudrait les démonter et les coûts seraient beaucoup trop élevés pour que le procédé soit rentable. Ceci implique notamment le fait qu'après réparation la période d'initiation de la cavitation est négligeable. Ainsi, après réparation en termes de fiabilité la roue ne revient pas à son état initial, mais au point de début d'érosion. Ensuite, en considérant qu'il a les même propriété en tout point, le matériau se dégrade à la même vitesse. Les figures 3.11, 3.12 & 3.13 illustrent cela.

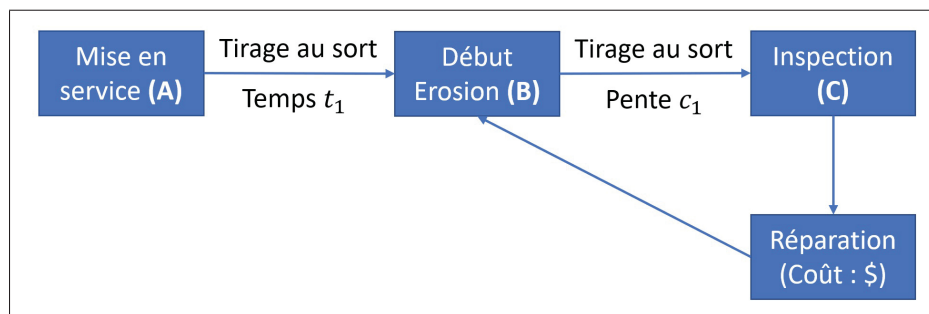


Figure 3.11 Cycle de réparation

Ainsi, après la première réparation, le temps t_1 est réduit à zéro et seule la pente c_1 est prise en compte dans le modèle.

Aux paramètres t_1 et c_1 s'ajoutent désormais le seuil de réparation (s_r) et la date des inspections I_1 . Soit t_{I_1} le temps des diverses inspections I_1 . À intervalle régulier celles-ci sont séparées d'une durée D , de telle sorte que $t_{I_{i+1}} = t_{I_i} + D$. Les temps auxquels interviennent les réparations sont

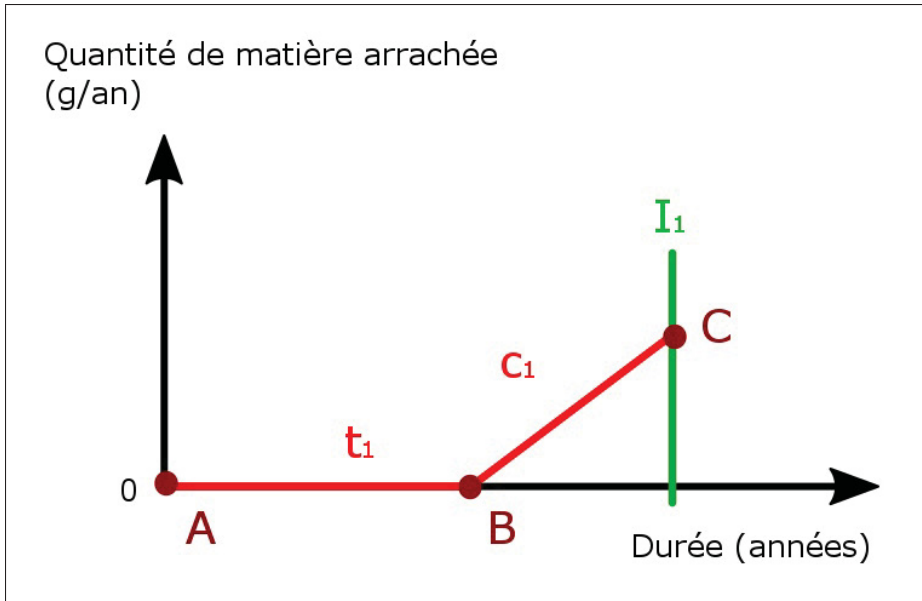


Figure 3.12 Points stratégiques du modèle de cavitation

notés t_{srj} . La durée entre deux réparations est multiple de D et dépend de la valeur de la pente c_1 .

- Avant t_1 le coût de la solution est nul. Si une inspection survient, il n'y aura pas encore eu d'arrachement de matière, le modèle implémenté ne pourra donc pas être calibré en fonction des essais en laboratoire.
- Après t_1 , avant t_{sr_1} : À chaque inspection I_1 , tant que $t < t_{sr_1}$, seuls les frais d'inspections sont ajoutés au calcul de la VAN. À la première inspection après t_{sr_1} , les frais de réparation sont ajoutés en prenant en compte $t_{occ} = t_1$ et $t_{initial} = t_0$.
- Après t_1 , après t_{sr_1} : À chaque inspection I_i , tant que $t < t_{sr_j}$, seuls les frais d'inspections sont ajoutés au calcul de la VAN. À la première inspection après t_{sr_j} , les frais de réparation sont ajoutés en prenant en compte $t_{occ} = t_{sr_{j-1}}$ et $t_{initial} = t_{sr_{j-1}}$.

3.2.4 Conception sous VME

Tout comme pour la fissuration, VME est l'outil choisi dans le cadre de cette analyse technico-économique. La suite de ces études aura donc une double vocation : à la fois, tester VME,

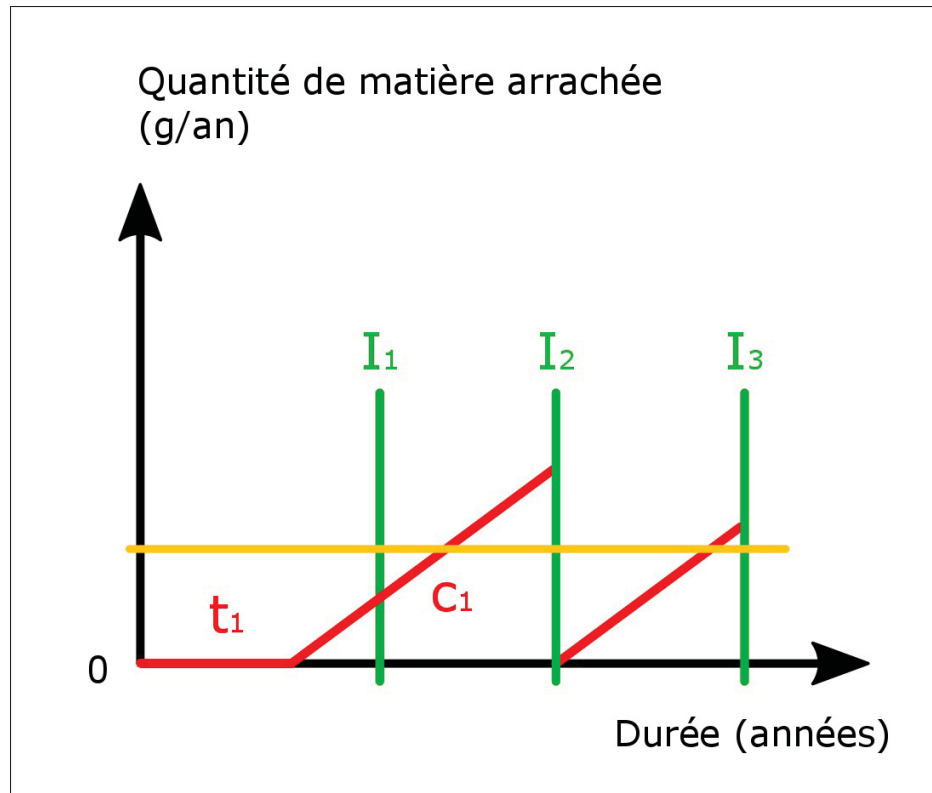


Figure 3.13 Évolution de la quantité de matière arrachée en fonction d'inspections

voir s'il est adapté au besoin formulé par Hydro-Québec, et réaliser une première analyse économique. C'est maintenant dans le cadre de la cavitation qu'il sera utilisé et évalué.

3.2.4.1 Le comptage du temps avec VME

Dans sa version 2017, VME ne permet pas de compter le temps. C'est-à-dire que si un événement a lieu, qu'une pièce est donc considérée comme « dégradée », lorsque la maintenance est enclenchée, le coût dépend uniquement d'une valeur fixée. Or, pour la cavitation, le coût dépend fortement du temps entre l'inspection et le début de l'érosion de cavitation. Puisque la turbine commence à s'éroder au temps t_1 , la durée entre ce moment et la date d'inspection correspond à une quantité de matière (voir Partie 3.2.1). Cette durée variable correspond donc à un coût variable également.

Partant de ce constat, et suite à des discussions sur ce modèle, l'équipe de développement EDF R&D, éditrice de l'outil VME a implémenté une nouvelle fonction.

Depuis janvier 2018 le bloc maintenance retient la date à laquelle l'évènement de dégradation a eu lieu et la date de réalisation de la maintenance. L'utilisateur peut alors choisir une constante α qui sera multipliée par la différence entre ces deux dates. Ce concept est donc une primo-introduction d'un comptage de temps sous VME.

Le coût est alors calculé comme suit :

$$\text{\$} = \alpha \cdot (t_{\text{maintenance}} - t_{\text{occurrence}}) \quad (3.13)$$

3.2.4.2 Introduction des variables aléatoires sous VME

VME est un outil probabiliste, c'est-à-dire qu'il permet de prendre en compte des variables aléatoires. C'est-à-dire qu'avec une loi de distribution aléatoire en entrée, il est capable, pour chaque simulation qu'il réalise, de tirer une valeur qui suit cette distribution.

Pour utiliser ce concept sous VME, il faut créer un « évènement ». Différentes lois sont alors proposées (Weibull, normale, gamma, logistique...). C'est alors une variable aléatoire du temps qui sera définie.

Ensuite cet évènement sera relié à des « Maintenance Préventive » ou « Maintenance Corrective ». Celles-ci se déclenchent alors à une date donnée pour les unes et au moment correspondant à la valeur tirée dans l'évènement pour l'autre (figures 3.14 & 3.15). Ces blocs maintenances peuvent ensuite, selon plusieurs règles, augmenter le coût de la solution et modifier les lois de fiabilité des divers évènements.

La manière d'implémenter le coût d'une solution est relativement basique : dans le bloc « Maintenance », onglet « Conséquence » il est possible de choisir un type de flux économique

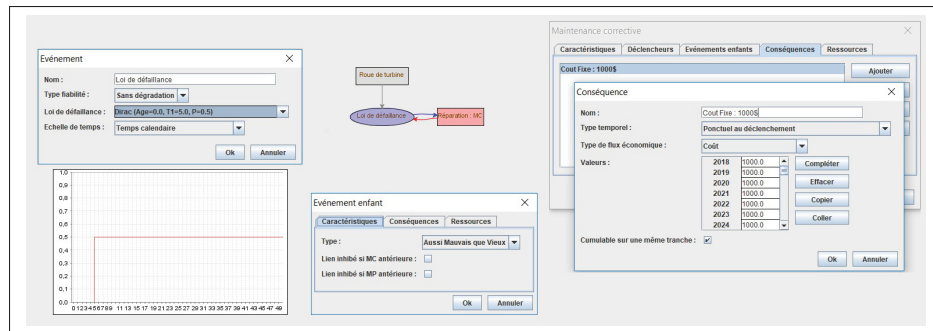


Figure 3.14 Exemple de conception d'un modèle simple sous VME

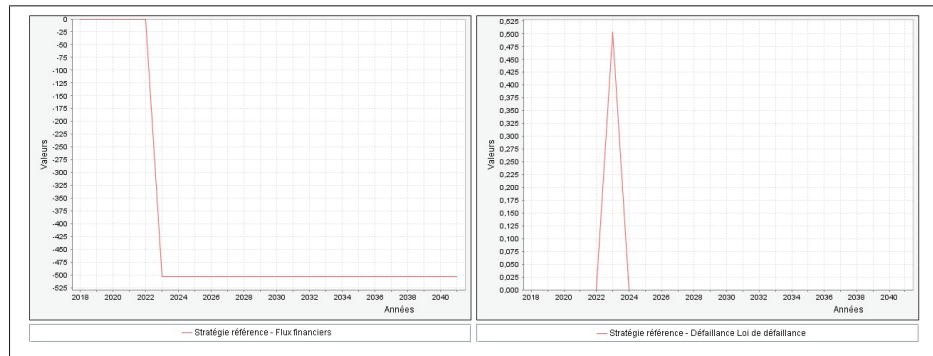


Figure 3.15 Exemples de graphes de sortie du modèle simple précédent

et une date d'application relative à la date de réalisation de la maintenance. Ensuite un coût est défini en fonction de l'année de réalisation.

3.2.4.3 Un premier modèle simple

À partir de ces quelques informations d'ordre général et du modèle établi dans la partie précédente, un premier modèle utilisant le calcul du temps est conçu (figure 3.16). Il reprend les mêmes valeurs que l'étude sur la fissuration.

Les valeurs utilisées sont fictives afin d'obtenir de premiers résultats. Dans le cadre d'une réelle étude, elles seront adaptées au cas par cas.

Tableau 3.1 Paramètres de l'étude
- Cavitation

Grandeur	Valeur
Année de début d'étude	1970
Durée de l'étude	50 ans
Taux d'actualisation	5,5%

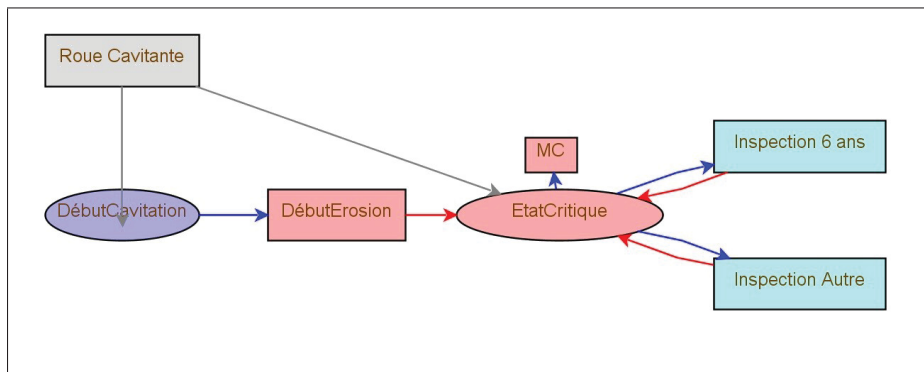


Figure 3.16 Modèle simple de cavitation sous VME

La pièce principale sera appelée '*Roue Cavitante*'. Le premier évènement est créé : '*Début-Cavitation*'. Un Dirac lui est initialement associé, correspondant au temps t_1 , alors supposé constant. La maintenance corrective va alors venir initialiser le bloc '*EtatCritique*'. Une loi de dégradation et une loi de défaillance y sont alors instaurées. Au cours d'une simulation, ce moment correspond au temps t_1 et dans la réalité cela traduit le début de l'érosion.

La loi de dégradation correspondra au moment à partir duquel le seuil s_r sera atteint. Ainsi la maintenance préventive '*Inspection 6 ans*', activée automatiquement tous les six ans aura comme coûts d'inspection les coûts fixes liés à l'installation. La maintenance étant enregistrée comme maintenance « conditionnelle inspection », les coûts de réparation ne seront additionnés que si le temps t tiré par la loi de dégradation est passé. Cette loi permet donc de simuler la pente c_1 . En effet, plus la pente c_1 est grande, plus l'intensité de cavitation est intense et plus le seuil s_r de réparation sera atteint rapidement. Enfin plus le seuil sera rapidement atteint, plus la durée calculée $(t - t_i)$ sera grande et le coût sera grand.

La figure 3.17 illustre ce comportement. Les résultats présentés correspondent au nombre d'occurrences de chaque événement divisé par le nombre de simulations réalisées exprimé en pourcentage. Le nombre de simulations est de 100 000, nombre choisi après un test de convergence pour assurer la validité du résultat au regard de la simulation de Monte-Carlo effectuée. La courbe bleue représente la défaillance initiale. Cela correspond au temps t_1 qui est tiré selon une loi aléatoire de type logistique ($\mu = 6$, $\sigma = 0,25$) choisie arbitrairement pour avoir un résultat appréciable sur la courbe. Cela a pour conséquences que la majorité des turbines sont non érodées jusqu'en 1973 – 1974 et quelques-unes en 1972 et 1975. En vert apparaissent les inspections, qui ont lieu périodiquement tous les six ans. La courbe rouge correspond aux défaillances de l'événement '*EtatCritique*' ce qui correspond au franchissement d'un seuil sr . Les cycles qui apparaissent correspondent à la durée moyenne entre le moment d'une réparation et le moment où le seuil est à nouveau dépassé. Ils traduisent la pente c_1 : plus c_1 est grand, plus l'intensité de cavitation est élevée et plus rapidement le seuil de quantité de matière arrachée avant une réparation est atteint. Les premières années très peu de turbines passent ce seuil, ensuite la dégradation choisie pour assurer. En fuchsia les années où les réparations ont lieu. Lors de la première inspection le seuil sr_1 n'est pas encore atteint, les turbines ont commencé à caviter mais la matière arrachée ne justifie pas d'une réparation. Lors de la seconde inspection, la majorité des turbines n'ont pas encore atteint le seuil sr_1 , mais quelques exceptions génèrent les premières réparations. Ensuite, le régime transitoire étant passé, tous les ans un nombre de réparation similaire est réalisé suivant les cycles de dégradation (seuils sr_j). Ces résultats indiquent que la partie technique du modèle est bien modélisée et correspond aux attentes définies dans la partie précédente.

3.2.4.4 Les limites de ce modèle

Il s'agit là d'un premier modèle qui prend en compte la technique de la cavitation, mais économiquement complètement erroné. Les coûts engendrés suivent une allure qui correspond aux attentes du modèle, mais deux facteurs principaux font que les valeurs économiques calculées sont biaisées.

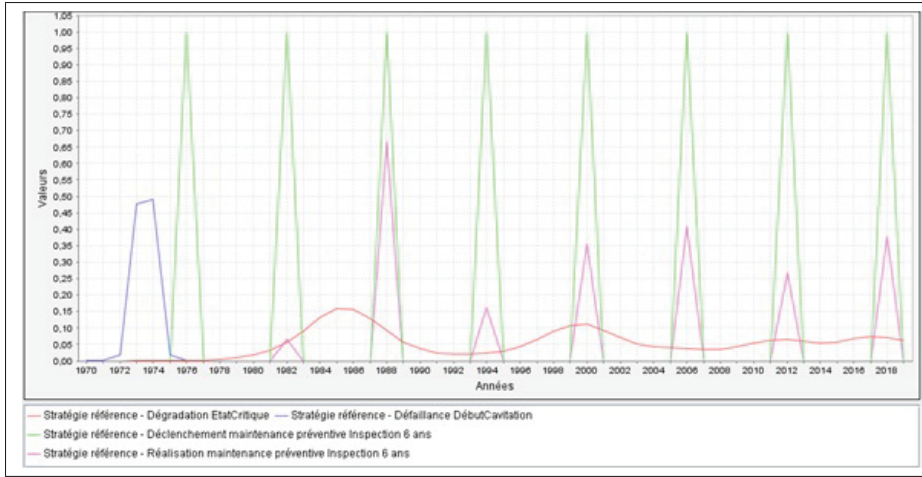


Figure 3.17 Résultats du modèle précédent

3.2.4.4.1 Des coûts erronés à cause de la linéarité

La linéarité introduite et qui multiplie simplement la durée entre deux évènements pour obtenir un coût traduit bien que plus le seuil de matière arrachée sera atteint rapidement, plus le coût de réparation sera élevé.

En effet, pour rappel, le coût est calculé comme suit :

$$\text{\$} = \alpha \cdot (t_{\text{maintenance}} - t_{\text{occurrence}}) \quad (3.14)$$

Cependant à partir du moment où les temps de dépassement $t_{\text{occurrence}}$ sont passés pour deux turbines les coûts engendrés deviennent identiques. Ci-après la démonstration, illustrée par la figure 3.18.

- Soient $t_1 = 0$, et deux turbines de pentes respectives c_1 et c_2 .
- Soit s_r le seuil de quantité de matière arrachée à partir duquel une réparation sera nécessaire.
- Soit t_i la date prévue de la première inspection.
- Soient d_1 la durée $(t_i - t_1)$ et d_2 la durée $(t_i - t_2)$.
- Soient $\text{\$}_1$ le coût de réparation pour la turbine 1, $\text{\$}_2$ pour la turbine 2.

Vient alors :

$$\begin{cases} \$_1 = \alpha \cdot d_1 \\ \$_2 = \alpha \cdot d_2 \end{cases} \quad (3.15)$$

Ainsi comme : $c_2 > c_1$, $t_2 < t_1$ et $d_2 > d_1$, donc finalement : $\$_2 > \$_1$, et la turbine qui a la plus grande intensité de cavitation coûtera plus cher à réparer.

Supposons désormais que l'inspection I_1 a lieu après une durée d_3 et notons $t'_i = t_i + d_3$ l'instant de cette inspection décalée.

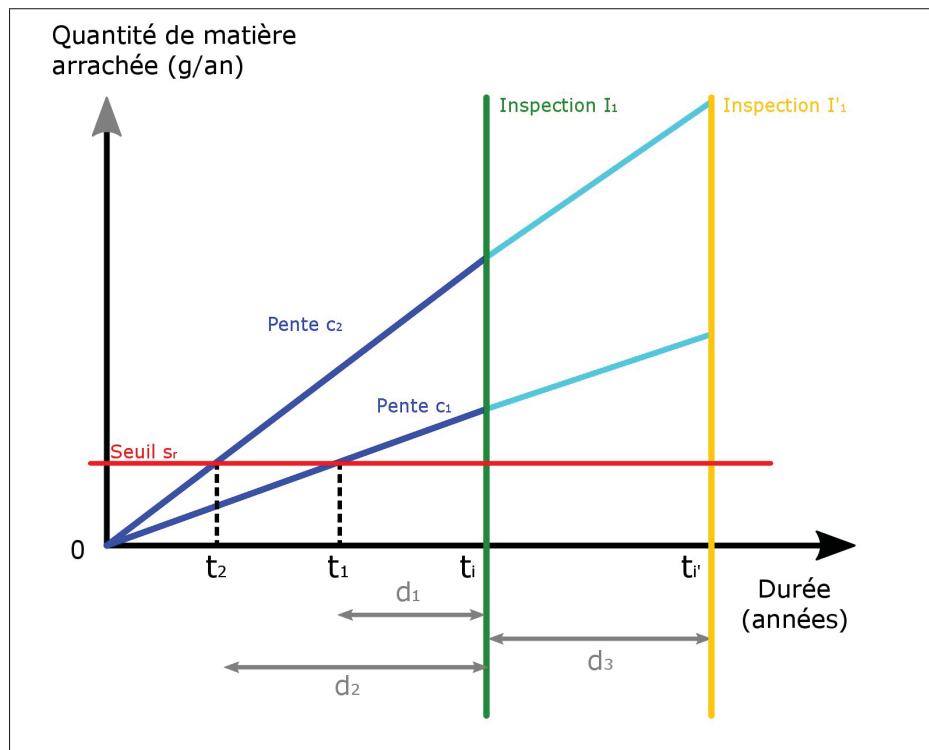


Figure 3.18 Calcul du coût, biais de la linéarité

Avec les mêmes notations que précédemment suivie d'une apostrophe pour décrire les évènements liés à I'_1 au lieu de I_1 :

$$\begin{cases} \$'_1 = \alpha \cdot d'_1 \\ \$'_2 = \alpha \cdot d'_2 \end{cases} \quad (3.16)$$

Ce qui semble suivre un ordre logique également.

Mais en décomposant $d'_1 = d_1 + d_3$, il vient :

$$\begin{cases} \$'_1 = \alpha \cdot (d_1 + d_3) \\ \$'_2 = \alpha \cdot (d_2 + d_3) \end{cases} \quad (3.17)$$

Soit :

$$\begin{cases} \$'_1 = \alpha \cdot d_1 + \alpha \cdot d_3 \\ \$'_2 = \alpha \cdot d_2 + \alpha \cdot d_3 \end{cases} \quad (3.18)$$

Et :

$$\begin{cases} \$'_1 = \$_1 + \alpha \cdot d_3 \\ \$'_2 = \$_2 + \alpha \cdot d_3 \end{cases} \quad (3.19)$$

Notons alors $C_s = \alpha \cdot d_3$ le coût supplémentaire associé au décalage de l'inspection :

$$\begin{cases} \$'_1 = \$_1 + C_s \\ \$'_2 = \$_2 + C_s \end{cases} \quad (3.20)$$

Ce qui traduit que lorsqu'une inspection est retardée, une turbine qui cavite plus ne coûtera pas plus cher alors que la quantité de matière arrachée sera plus grande. La seule différence s'effectue sur la durée entre le dépassement du seuil pour la turbine T1 et la turbine T2. La différence de coût de réparation sera donc toujours égale à :

$$\$_{diff} = \alpha \cdot (t_1 - t_2) \quad (3.21)$$

Ainsi les pentes c_1 n'interviennent pas sur l'ensemble de la perte de masse, mais uniquement sur la perte de masse jusqu'à avoir atteint un seuil fixé à l'avance, le seuil s_r . Il va donc falloir implémenter une nouvelle fonction pour pallier ce problème et relier correctement l'aspect technique à l'aspect économique du modèle.

3.2.4.4.2 t_1 n'est pas pris en compte

Le coût calculé est celui entre l'instant de la dégradation (donc où le seuil s_r est atteint) et celui de l'inspection. La durée t_1 n'est donc pas prise en compte. Ce phénomène ne s'applique qu'avant la première réparation, mais reste toutefois important. Il n'est donc pas envisageable pour une étude précise de le négliger.

3.2.4.5 Impossibilité actuelle de combiner deux variables aléatoires

Il est important de noter que les seules variables aléatoires disponibles sont des variables aléatoires du temps et qu'elles ont un impact direct sur la solution puisque les dates retenues seront enregistrées pour déclencher des maintenances.

Le modèle de cavitation défini utilise deux variables aléatoires :

- Le temps t_1 : durée avant que l'érosion ne commence lors de la cavitation.
- La pente c_1 : intensité de la cavitation à partir du moment où l'érosion a débuté.

Ainsi, des deux variables aléatoires définies, une seule correspond au temps. La seconde est une pente : il va donc falloir travailler à utiliser VME de manière dérivée afin d'obtenir des résultats plus réalistes.

Par ailleurs, la manière d'utiliser ces variables aléatoires est celle définie dans la partie précédente (VME le comptage du temps). Une variable est une variable temporelle, la valeur tirée aléatoirement correspondra à une date au cours du temps et qui déclenchera une maintenance (corrective quoi qu'il arrive puis préventive si définie).

3.2.4.6 Analyse technico-économique et évaluation de VME

Le sujet de ce rapport est à la fois de démontrer si VME est un outil adapté à l'analyse technico-économique des roues de turbines et à la fois de réaliser l'analyse la plus réaliste avec l'outil. À ce stade de la réflexion, un modèle très simplifié de la cavitation a été proposé. Toutefois il n'est

pas possible de modéliser correctement la cavitation sous VME avec des coûts qui évoluent de manière réelle.

Dans le cadre de la collaboration avec EDF et de la modification récemment effectuée pour prendre en compte le temps dans le calcul du coût, une discussion a été ouverte. L'objectif serait de pouvoir multiplier les deux variables temporelles par des coefficients différents, les multiplier entre elles ou même obtenir des termes au carré. Ainsi à la place de disposer d'une unique constante à multiplier par la différence de deux variables, de nombreuses constantes permettraient de générer des fonctions de coûts complexes. Par ailleurs ces constantes (dimensionnées) permettraient de tirer des variables aléatoires qui seraient associées à des unités autres que les temps.

3.2.4.7 Vers une ouverture de la fonction de coût

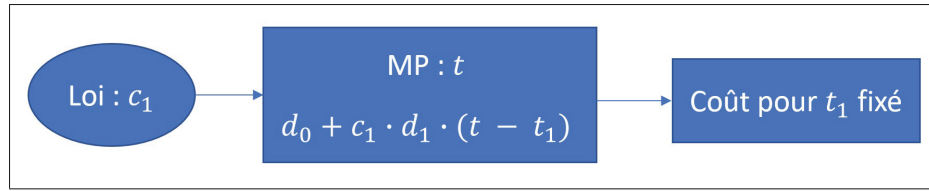
Malgré cette modification simple, seule une variable aléatoire peut être prise en compte dans un bloc maintenance. Il n'est en effet pas actuellement possible de diriger deux blocs « évènements » vers un bloc « maintenance » pour retenir deux dates, qui correspondraient aux deux variables aléatoires du modèle de cavitation proposé. Ainsi suivent deux propositions de modèles basés sur le modèle précédent incluant la modification en cours de discussion et permettant d'en dégager l'utilité.

3.2.4.7.1 Soit t_1 fixé

Cela revient à supposer que la période de non-érosion est constante au cours des simulations. Pour une turbine, t_1 aura une valeur fixe et c_1 sera la seule variable aléatoire (figure 3.19).

Pour rappel, le modèle défini précédemment est :

$$Q_{mat}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < t_1 \\ c_1 \cdot (t - t_1) & \text{si } t > t_1 \end{cases} \quad (3.22)$$

Figure 3.19 Coût pour t_1 fixé

Puisque le temps t qui est évalué ici est connu et celui de l'instant de l'inspection et que le coût n'est engendré qu'à partir du temps t_1 , connu, une nouvelle variable Q_{mi} est défini :

$$Q_{mi}(t_i, c_1) = c_1 \cdot (t_i - t_1) \quad (3.23)$$

Soit :

$$Q_{mi}(t_i, c_1) = c_1 \cdot t_i - c_1 \cdot t_1 \quad (3.24)$$

Il s'agit donc d'un polynôme de la forme :

$$Q_{mi}(t_i, c_1) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot c_1 + \alpha_2 \cdot t_i + \alpha_3 \cdot t_i \cdot c_1 \quad (3.25)$$

Avec :

$$\begin{cases} \alpha_0 = \alpha_2 = 0 \\ \alpha_1 = t_1 \\ \alpha_3 = 1 \end{cases} \quad (3.26)$$

À ce polynôme il faudra ensuite appliquer la transformation linéaire pour passer de la quantité de matière au coût de la réparation, ce qui donnera de nouveaux coefficients avec de nouvelles dimensions, mais donnera bien un coût en \$.

$$\$(t, t_1, c_1) = \begin{cases} B & \text{si } t < t_1 \\ A \cdot c_1 \cdot (t - t_1) + B & \text{si } t > t_1 \end{cases} \quad (3.27)$$

Le coût à l'inspection serait alors défini tel que :

$$\$_i(t_i, c_1) = A \cdot c_1 \cdot (t_i - t_1) + B \quad (3.28)$$

Avec A et B les paramètres de la fonction de coût.

Vient ensuite :

$$\$_i(t_i, c_1) = A \cdot c_1 \cdot t_i - A \cdot c_1 \cdot t_1 + B \quad (3.29)$$

De la même manière que pour la quantité de matière, il s'agit d'un polynôme de la forme :

$$\$_i(t_i, c_1) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot c_1 + \alpha_2 \cdot t_i + \alpha_3 \cdot t_i \cdot c_1 \quad (3.30)$$

Avec :

$$\begin{cases} \alpha_0 = B \\ \alpha_1 = -A \cdot t_1 \\ \alpha_2 = 0 \\ \alpha_3 = A \end{cases} \quad (3.31)$$

Toutefois pour pouvoir s'adapter à tous les cas de figure, la fonction serait envisagée d'une manière plus complète. Le coût en dollars d'un bloc maintenance aurait deux entrées : t_m et t_d le temps où la maintenance est effectuée et celui où la dégradation a eu lieu.

$$\$_i(t_m, t_d) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot t_m + \alpha_2 \cdot t_d + \alpha_3 \cdot t_m \cdot t_d + \alpha_4 \cdot t_m^2 + \alpha_5 \cdot t_d^2 \quad (3.32)$$

Il s'agit là d'un exemple qui permettrait, mais tout type de fonction préparamétrée pourrait être envisagée.

Dans le cas présent où $t_m = t_i$ et $t_d = c_1$, le vecteur α correspondant à cette fonction serait :

$$\alpha = [\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5] = [B, 0, -A \cdot t_1, A, 0, 0] \quad (3.33)$$

Pour arriver cela, le modèle est quasiment le même qu'utilisé précédemment, les modifications sont les suivantes :

- '*DébutCavitation*' sera tiré selon la loi choisie, qui se déclenchera au « temps » c_1 . c_1 n'est effectivement pas un temps. Dans VME initialement interprété comme un temps, cette valeur servira uniquement pour le calcul du coût et ne sera reliée à aucun évènement temporel à proprement parler. Le changement d'unité se fera alors avec les constantes du vecteur entré. Dans le cas où la valeur temporelle affectée à c_1 serait supérieure au temps de l'inspection, un facteur multiplicatif serait ajouté dans la constante pour réduire la « durée c_1 » et la rendre inférieure à la date d'inspection prévue.
- '*DébutErosion*' sera ensuite systématiquement activée et viendra placer une loi de dégradation dans '*EtatCritique*' qui indiquera une dégradation à l'instant initial (du déclenchement relatif du bloc, donc à $t = \text{valeur}(c_1)$ dans l'absolu).
- Il n'y a donc plus de notion de seuil critique.
- Le coût sera calculé en utilisant le vecteur $\alpha = [B, 0, -A \cdot t_1, A, 0, 0]$.

Ici A et B jouent le rôle de constantes permettant de transformer les variables aléatoires tirées en dollars pour la fonction de coût. Par ailleurs, ce type de modélisation permet également de modéliser des coûts plus complexes (quadratiques ou autres). De la même manière que t_m et t_d ont été mis au carré, prévoir une utilisation exponentielle, logarithmique ou tout autre degré polynomial est envisageable.

Avec cette méthode il serait désormais possible d'utiliser des variables aléatoires et de s'en servir de manière atemporelle. VME permettrait donc de faire des calculs de coûts assez sophistiqués.

Cependant comme vu en partie 3.2.3.4, le comportement n'est plus le même à partir de la première réparation puisque le temps de non-érosion n'existe plus après les réparations où le traitement thermique n'a pas lieu. Cela se traduit par un simple ajout dans le modèle VME (figure 3.20) où la même équation que définie précédemment est entrée, mais avec pour valeur

$t_1 = 0$. Le vecteur entré devient alors : $\alpha = [B, 0, 0, A, 0, 0]$ pour la maintenance préventive 'Inspection 6 ans – PostRepa'.

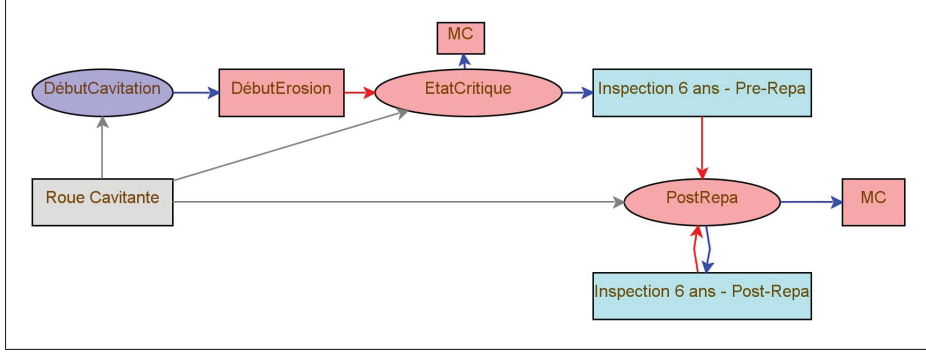


Figure 3.20 Prise en compte de la période post-réparation

3.2.4.7.2 Soit c_1 fixé

De la même manière que t_1 , il est possible de fixer c_1 . Ici la seule variable aléatoire étudiée serait t_1 tandis que la pente et donc l'intensité de dégradation seraient constantes (figure 3.21).

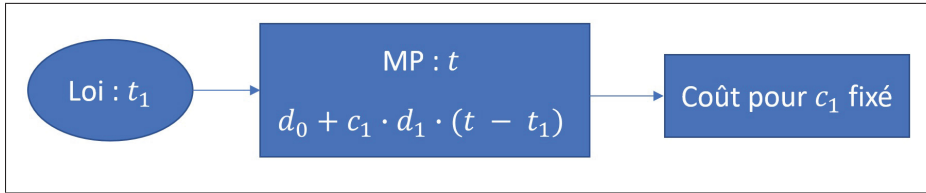


Figure 3.21 Coût pour c_1 fixé

En utilisant exactement le même procédé que précédemment le coût à l'inspection est défini tel que suit :

$$\$_i(t_i, t_1) = A \cdot c_1 \cdot (t_i - t_1) + B \quad (3.34)$$

Ici c'est t_1 qui fait partie des paramètres au lieu de c_1 , soit en décomposant :

$$\$_i(t_i, t_1) = A \cdot c_1 \cdot t_i - A \cdot c_1 \cdot t_1 + B \quad (3.35)$$

D'après la formule générale :

$$S(t_m, t_d) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot t_m + \alpha_2 \cdot t_d + \alpha_3 \cdot t_m \cdot t_d + \alpha_4 \cdot t_m^2 + \alpha_5 \cdot t_d^2 \quad (3.36)$$

Puisqu'ici $t_m = t_i$ et $t_d = t_1$ cela implique :

$$\alpha = [\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5] = [B, A \cdot c_1, -A \cdot c_1, 0, 0, 0] \quad (3.37)$$

Ici encore, le modèle VME est presque identique, les modifications sont les suivantes :

- '*DébutCavitation*' sera tiré selon la loi probabiliste déterminée, qui se déclenchera à la valeur t_1 .
- '*DébutErosion*' sera alors systématiquement activée et viendra placer une loi de dégradation dans '*EtatCritique*' indiquant une dégradation à l'instant initial (du déclenchement relatif du bloc, donc à $t = t_1$ dans l'absolu).
- Il n'y a pas de notion de seuil critique.
- Le coût sera calculé en utilisant le vecteur $\alpha = [B, A \cdot c_1, -A \cdot c_1, 0, 0, 0]$.

3.2.4.8 Limites de VME : solution globale

Les paragraphes précédents se sont concentrés à détailler une solution partielle pour résoudre les incertitudes sur la cavitation grâce à une modification simple de VME. Ici nous cherchons à établir une solution qui permettrait de modéliser les coûts en fonction de deux lois probabilistes simultanément.

3.2.4.8.1 Présentation d'une solution globale

Puisque les événements tirés par VME sont des valeurs temporelles déclenchant des maintenances, il est possible dans le cadre d'une maintenance d'opérer sur deux dates : celle de déclenchement de l'évènement et celle d'occurrence de la maintenance. Les deux variables sur lesquelles il est possible d'intervenir sont la variable aléatoire tirée et la date de maintenance

prévue. Le problème ici est que le coût des réparations est directement impacté par deux variables aléatoires dont les valeurs sont multipliées. Il n'est donc pas possible de les sommer simplement. Pour résoudre ce problème, il faudrait un bloc qui soit capable de retenir plusieurs dates. Dans ce cas-là deux lois pourraient être tirées indépendamment, générant deux dates correspondant d'une part à c_1 et d'autre part à t_1 .

Ainsi si le bloc maintenance avait la mémoire de ces événements qui lui seraient reliés, un polynôme pourrait être associés aux trois paramètres c_1 , t_1 et t_i (figure 3.22).

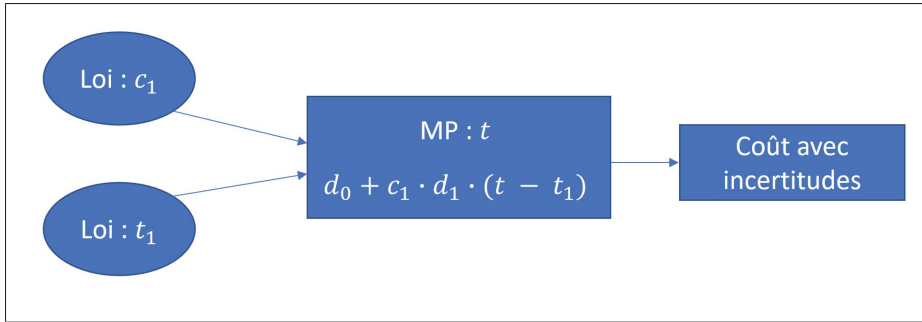


Figure 3.22 Utilisation de deux variables aléatoires dans le calcul des coûts

3.2.4.8.2 Alternative plausible à cette solution

Le coût global d'une réparation a été défini comme suit :

$$\$_i(t_i, t_1) = A \cdot c_1 \cdot (t_i - t_1) + B \quad (3.38)$$

Les deux variables aléatoires c_1 et t_1 peuvent se décomposer en une valeur moyenne plus une incertitude de telle sorte que :

$$c_1 = c_{1,1} + \Delta c_1 \quad (3.39)$$

$$t_1 = t_{1,1} + \Delta t_1 \quad (3.40)$$

Où $c_{1,1}$ et $t_{1,1}$ sont des constantes et Δc_1 et Δt_1 traduisent l'incertitude de la variable.

Le coût s'exprime alors :

$$\$_i(\Delta c_1, \Delta t_1, t_i) = A \cdot (c_{1,1} + \Delta c_1) \cdot (t_i - (t_{1,1} + \Delta t_1)) + B \quad (3.41)$$

Où les variables aléatoires ne sont plus que les variations autour de la valeur moyenne fixée, qui elle est intégrée dans les constantes.

Ainsi, une fonction aléatoire suivant une distribution définie à l'avance permettrait de modéliser l'une ou l'autre des incertitudes en court-circuitant le modèle de tirage aléatoire de VME. Il y aurait donc une variable aléatoire dont la distribution serait réglable à souhait et une variable dont la distribution serait fixée avec des paramètres bien définis à choisir.

Par exemple :

$$c_1 = c_{1,1} + \beta \cdot \text{random}(\mu_\beta, \sigma_\beta) \quad (3.42)$$

Où β est une constante et $(\mu_\beta, \sigma_\beta)$ des paramètres d'une fonction aléatoire.

Ce qui mène à :

$$\$_i(\Delta c_1, \Delta t_1, t_i) = A \cdot (c_{1,1} + \beta \cdot \text{random}(\mu_{\beta c}, \sigma_{\beta c})) \cdot (t_i - (t_{1,1} + \beta \cdot \text{random}(\mu_{\beta t}, \sigma_{\beta t}))) + B \quad (3.43)$$

Où finalement le coût dépend uniquement de t_i . Dans cet exemple, il s'agit d'un cas extrême, les deux variables aléatoires ont été remplacées et il n'y a donc plus de tirage qui aurait lieu dans VME. Cependant cela impliquerait que les deux variables suivent la même distribution d'incertitude simple, ce qui n'est pas le cas. Dans ce cas-là, le moteur de simulation Monte-Carlo n'aurait plus d'utilité et ce n'est pas l'objectif. Il est toutefois désormais de conserver une seule des deux variables aléatoires et venir approximer des résultats très proches du modèle initialement énoncé en ajustant correctement les constantes d'un polynôme défini.

3.2.4.8.3 Le choix entre les deux variables : t_1 ou c_1

Les parties 3.2.4.7 et 3.2.4.8 n'étant que présentation d'un modèle imaginé sous condition de modifications par VME, il va de soi que des concessions seront à faire. Cette sous-partie s'intéresse à l'importance de chacune des deux variables aléatoires et à comment choisir sur laquelle mettre l'accent. Notons toutefois que ce qui est présenté ici est toujours spéculatif sur la base d'une modification de la fonction de coût.

- t_1 : période non observable actuellement : introduite pour le besoin de la valeur de l'information. Ne se répète pas après la première réparation (traitement thermique).
- c_1 : la pente : définit le matériau et le taux d'érosion, c'est la raison de l'arrachement de matière.

Au regard du peu d'information disponible sur chacune de ces deux variables aléatoires, il semble que c_1 soit la variable aléatoire la plus importante, et qu'il est plus pertinent de fixer t_1 . Ainsi un des deux paramètres aléatoires (t_1) ne l'est plus, il n'y a donc plus d'incertitude dessus. Il est toutefois possible de dupliquer certains blocs pour calculer la VAN entre deux pentes différentes tout en fixant t_1 comme sur la figure 3.23.

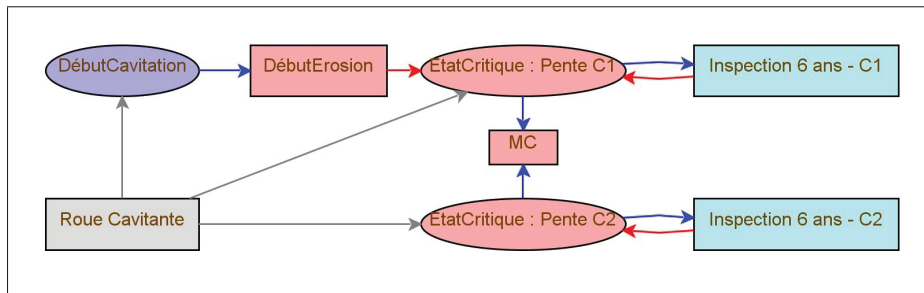


Figure 3.23 Modèle de comparaison de deux pentes

Il est donc possible d'évaluer l'impact de l'incertitude sur t_1 sur deux pentes fixes différentes, et vice-versa. Sur le modèle de la figure 3.23, un temps t_1 est tiré selon une loi aléatoire, les deux lois « EtatCritique » c_1 et c_2 sont placées en mode dégradée

Au temps $t = t_i$, la VAN peut être calculée :

$$VAN = \$_{i,c_1}(t_i, t_1) - \$_{i,c_2}(t_i, t_1) \quad (3.44)$$

$$VAN = (A \cdot c_1 \cdot t_i - A \cdot c_1 \cdot t_1 + B) - (A \cdot c_2 \cdot t_i - A \cdot c_2 \cdot t_1 + B) \quad (3.45)$$

$$VAN = A \cdot (c_1 - c_2) \cdot (t_i - t_1) \quad (3.46)$$

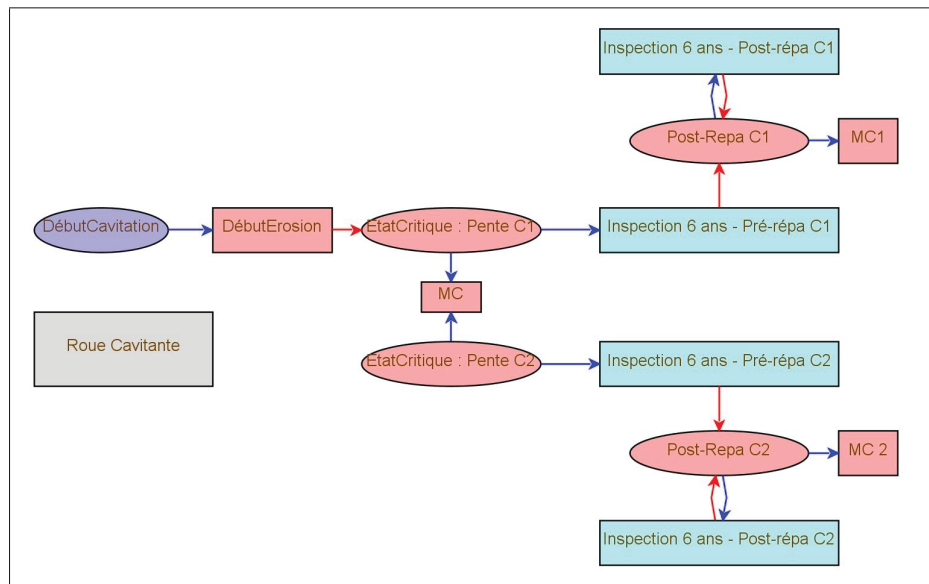


Figure 3.24 Modèle complet de cavitation

En combinant ce modèle avec le précédent qui prend en compte le traitement du coût après la première réparation et en ajustant correctement les constantes de calcul aux fonctions aléatoires désirées, un modèle complet, cohérent et réaliste de la cavitation est réalisé (figure 3.24).

3.3 Conclusion

La cavitation est due aux variations de pression dans l'écoulement. Cette variation de pression entraîne des changements d'état de l'eau, et le passage de bulle de vapeur à liquide génère une

onde de choc qui vient ensuite éroder la paroi de la turbine. Ce phénomène d'érosion a lieu en deux temps : un écrouissage dû aux contraintes mécaniques précède l'arrachement de matière.

La cavitation a été appréhendée de manière assez simple avec un modèle mathématique en deux portions de droites, introduisant simplement deux variables aléatoires : une durée de non-érosion avant que l'arrachement de matière ne commence et ensuite une vitesse d'érosion. Ces deux variables varient en fonction du matériau de la turbine étudiée. Elles peuvent également évoluer au cours du temps notamment avec les inspections régulières qui peuvent mener à une réévaluation de ces variables.

Un premier modèle simple a été créé sous VME à l'aide d'une nouvelle fonction implémentée à cette fin par les équipes d'EDF R&D. L'aspect technique des réparations s'est avéré relativement simple à modéliser tandis que l'aspect économique s'est montré assez approximatif vis à vis du niveau de précision désiré. A ce jour VME n'est donc pas opérationnel pour modéliser la cavitation suivant le modèle désiré dans cette étude. Des discussions ont été ouvertes afin d'élargir les capacités de la nouvelle fonction de calcul du coût. Enfin des solutions ont été proposées en anticipant cette fonction permettant d'appliquer le modèle mathématique défini à VME, mais la vérification reste à faire dans le cadre de travaux à venir.

Par ailleurs, comme VME est conçu pour réaliser des simulations de Monte Carlo sur des modèles complexes, rendant difficile la prédiction et la vérification des résultats. La force de VME est d'être un outil pour rallier les experts (l'opinion de plusieurs experts est mieux que celle d'un seul), mais idéalement, il faudrait refaire les mêmes cas avec d'autres logiciels de simulation (tel qu'Aréna) et faire des analyses similaires sur plusieurs centrales comparables.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Nous rappelons au lecteur que ce projet a pour objectifs principaux de réaliser une analyse technico-économique sous VME et d'évaluer la capacité de VME à réaliser l'étude au plus fidèle de la connaissance des experts.

En premier lieu nous avons détaillé le modèle technico-économique de la fissuration. Une analyse de fiabilité a permis d'avoir un ordre de grandeur de la loi de fiabilité et servi de base à la construction des modèles. C'est ensuite la compréhension de la physique de la fissuration et du contexte particulier des turbines hydrauliques qui a joué un rôle majeur dans l'élaboration du modèle de fissuration. En effet, une fois la physique bien appréhendée, l'essentiel du travail a été la construction du modèle. C'est ainsi que nous avons construit plusieurs modèles simples dans un premier temps, pour les assembler ensuite. C'est peu à peu que nous avons ajouté des durées de réparations aléatoires, une dégradation plus proche de la réalité, des aubes en série à la place d'une roue, un système de comptage et l'option d'une roue de remplacement. Une fois le modèle réalisé, la méthode de Kaplan Meyer a permis de vérifier le modèle. En dégradant artificiellement les aubes une à une, nous avons pu remonter jusqu'aux lois de fiabilité de roues de turbines à divers stades de dégradation. Le modèle global s'est alors comporté comme nous l'avions prévu : plus le nombre d'aubes dégradées est grand, plus le nombre de bris augmente.

C'est ensuite la cavitation que nous avons modélisée. Ce phénomène physique est plus simple à appréhender car croissant et continu. Contrairement à la fissuration, si aucune cavitation n'est observée lors d'une inspection, il ne pourra pas y avoir une impressionnante cavité à la prochaine inspection. Afin de réaliser la première approche sous VME nous avons considéré deux phases de dégradations où la quantité de matière arrachée au cours du temps est linéaire. S'il ne s'agit pas de la réalité, les experts de l'IREQ se sont accordés à dire que les études en laboratoires permettaient de confirmer cette approximation. Toutefois ajouter de l'incertitude sur ces deux phases s'est avéré épineux pour VME. Nous avons pu fixer une des deux pentes

et considérer l'autre avec de la variabilité sur ses paramètres (coefficient directeur, ordonnée à l'origine) puis faire l'inverse. Après des discussions avec EDF R&D nous avons proposé de nouveaux modèles permettant d'anticiper les modifications en cours. Terminer cette étude et vérifier ces modèles fera partie des travaux à venir dans le cadre de l'analyse technico-économique. Ainsi nous avons pu appréhender cavitation et fissuration à l'aide de VME et y associer des valeurs économiques. Ce qui permet de préférer une stratégie à telle ou telle autre. L'objectif étant à terme d'obtenir à la fois les valeurs techniques qui permettront d'aboutir sur les bonnes quantités de bris et à la fois les valeurs économiques qui seront nécessaires pour appuyer les résultats financiers. Cela permettra alors finalement d'estimer, au regard des hypothèses simplificatrices faites, quelle serait la stratégie la plus intéressante. Nous pourrions aussi savoir à quel point et avec quel niveau de risque telle ou telle stratégie est rentable par rapport à une autre.

Une concaténation de ce modèle de cavitation avec le modèle de fissuration sera la prochaine étape pour un modèle technico-économique complet des roues de turbines Francis. En effet, si ces deux phénomènes sont indépendants, le changement d'une roue et la mutualisation des inspections peuvent engendrer des modifications de fiabilité qui n'ont pas été prises en compte jusque-là. Ces modifications-là auraient vraisemblablement tendance à faire diminuer les coûts, il reste à démontrer dans quelle mesure. Pour obtenir de premiers résultats significatifs, des travaux sont en cours pour réaliser une analyse de sensibilité sur ces modèles. Les paramètres les plus pertinents ont été retenus pour chacun des deux modèles. Par exemple, diminuer le pourcentage de turbines qui brisent dû au manque de connaissance permettrait de quantifier la valeur de cette information. Combien sommes-nous prêts à dépenser dans un projet de recherche pour évaluer de manière plus fiable le nombre de turbines qui fissureront à leur première utilisation ? Ensuite, des perspectives d'optimisation seront à envisager pour déterminer les stratégies les plus viables et moins coûteuses. Une autre collaboration entre EDF et l'IREQ œuvre déjà à

cet effet avec le support de la plateforme d'optimisation NOMAD, développée par la société GERAD.

Pour ce qui est du logiciel utilisé, malgré les difficultés nous avons pu modéliser la pensée des experts et approximer les modèles que nous voulions obtenir. Un grand avantage de travailler avec un logiciel comme VME édité par une équipe avec qui la communication est fluide est que nos remarques sont rapidement entendues. Au cours de la réalisation du modèle, nous avons soumis nos remarques à l'équipe d'EDF R&D qui est à notre écoute. Au-delà de l'aspect pratique et utilisation, la plus grosse limite actuelle est qu'il est impossible d'effectuer une mesure du temps et aiguiller diverses solutions en fonction de la durée entre une inspection et un bris. De la même manière, il n'est pas possible qu'une maintenance soit déclenchée par deux évènements distincts. Lorsque ces problèmes seront résolus, d'autres modèles plus complexes de chacun des deux phénomènes pourront alors être envisagés. Présentement un doctorat à l'IREQ est en cours sur la modélisation et la prédiction de la fiabilité des roues de turbines hydrauliques traitant notamment de la cavitation. Orienté vers les processus gamma, ce doctorat permettra sûrement l'élaboration d'un nouveau modèle de cavitation à incorporer dans VME et de gagner en précision sur l'évaluation des diverses stratégies de réparation.

BIBLIOGRAPHIE

- (2005). *NF EN Gestion de la sûreté de fonctionnement - Partie 3-3 : Guide d'application - Évaluation du coût du cycle de vie* : NF EN 60300-3-3.
- Boson-Clermont, M.-P. (2015). *Modélisation statistique de l'érosion de cavitation d'une turbine hydraulique selon les paramètres d'opération*. (Thèse de doctorat, Université de Montréal).
- Boudreau, J.-F. (2013). *Rapport de stage - Beauharnois*. Hydro-Québec.
- Boudreau, J.-F. & Lonchamp, J. (2016). *Analyse technico-économique de l'achat d'une roue de remplacement pour la centrale Beauharnois*. Hydro-Québec.
- Bourdon, P. (2000). *Détection vibratoire de l'érosion de cavitation des turbines Francis*. (Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne).
- Escaler, X., Egusquiza, E., Farhat, M., Avellan, F. & Coussirat, M. (2006). Detection of cavitation in hydraulic turbines. *Mechanical systems and signal processing*, 20(4), 983–1007.
- Franc, J.-P. D., Avellan, F., Belahadji, B., Billard, J.-Y., Briançon-Marjollet, L., Fréchou, D., Fruman, D., Karimi, A., Kueny, J.-L. & Michel, J.-M. (1995). *La cavitation : mécanismes physiques et aspects industriels*. Presses universitaires de Grenoble PUG.
- Gagnon, M. (2014). *Développement du volet de fissuration* (Rapport n°Projet PrÉDDIT). Varennes, Québec, Canada : Hydro-Québec.
- Gagnon, M. & Thibault, D. (2015). Turbine dynamic behavior and expected fatigue reliability. *6th IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems*, pp. 9–11.
- Gagnon, M., Tahan, A., Bocher, P. & Thibault, D. (2013a). On the fatigue reliability of hydroelectric Francis runners. *Procedia Engineering*, 66, 565–574.
- Gagnon, M., Tahan, A., Bocher, P. & Thibault, D. (2013b). A probabilistic model for the onset of High Cycle Fatigue (HCF) crack propagation : Application to hydroelectric turbine runner. *International Journal of Fatigue*, 47, 300–307.
- Jones, T. & Smith, D. (1982). An historical perspective of net present value and equivalent annual cost. *The Accounting Historians Journal*.
- Kitagawa, H. & Takashi, S. (1976). Applicability of fracture mechanics to very small crack. *Mechanical Behaviour of Materials*.
- Lafleur, F. (2012). Vibratory detection system of Cavitation Erosion : Historic and Algorithm Validation. *Proceedings of the Eighth international symposium on Cavitation*.

- Lamothe, T. (2017). *Analyse technico-économique des stratégies de maintenance de roue de turbines hydrauliques. Partie 1 : Étude du phénomène de fissuration*. (Rapport n°1). Varennes, Québec, Canada : Hydro-Québec.
- Lonchampt, J. (2017). VME a tool for risk informed engineering asset management. *12th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2017)*.
- Lyonnet, P. (1992). *La maintenance : mathématiques et méthodes*.
- Peters, A., Sagar, H., Lantermann, U. & el Moctar, O. (2015). Numerical modelling and prediction of cavitation erosion. *Wear*, 338, 189–201.
- Rausand, M. (2004). *System Reliability Theory*. Wiley Interscience.
- Zhang, H. M. & Zhang, L. X. (2013, 3). Numerical Prediction of Cavitation Erosion on a Francis Turbine Runner. *Engineering Solutions for Manufacturing Processes*, 655(Advanced Materials Research), 449–456.
- Zio, E. (2013). *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. Wiley Interscience.