



Établissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès

Remerciements

J'adresse de chaleureux remerciements à mon encadrant et Directeur de thèse **Pr. Mohammed EL HAMMOUMI** pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés pour la réussite de cette thèse. Sa patience et sa confiance ont été des éléments moteurs pour moi.

Je voudrais également remercier énormément les membres de jury de cette thèse : le Président **Pr. Taoufiq ACHIBAT**, les rapporteurs **Pr. Said EL FEZAZI** , **Pr. Nour-eddine BOUTAMMACHTE**, **Pr. Said HAOUACHE** et examinateur **Pr. Anas CHAFI** pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail de recherche.

Bien sûr, atteindre mes objectifs n'aurait pas été possible sans l'aide des membres, Doctorants et Professeurs du laboratoire des Techniques Industrielles de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès.

Je désire grandement remercier tous mes collègues pour leur aide et leur bonne humeur. Nous avons partagé de très bons moments.

Enfin, je remercie vivement **mes parents, ma femme, ma sœur, mes frères et tous les membres de la famille** pour leur soutien inconditionnel et motivation au cours de ces années et sans lesquels je n'en serais pas là aujourd'hui.

Résumé

Éviter la dégradation d'un système, même en cas de réserve, est impossible. La complexité des systèmes industriels rend difficile le choix optimal du mix des stratégies de maintenance dans un tel environnement. Nous avons parcouru les différentes sources de documentations pour constituer l'état de l'art pour les outils de modélisation et évaluation des stratégies pour les systèmes complexes. Ces modèles varient avec les domaines d'activités et la complexité des systèmes, ils assument, parfois, des simplifications exagérées qui remet en cause le recours au choix optimal.

Une étude de diagnostic sur terrain a été tenue pour recenser les besoins des utilisateurs et décideurs dans le domaine de la maintenance. Les exigences retenues ont été examinées avec les limitations de recherches identifiées afin de proposer un modèle générique pour la modélisation basée sur la simulation auquel se rajoute une approche de classification et identification des perturbations dans les systèmes traduisant l'apparition des défaillances dites cachées.

Le modèle proposé permet de simuler les stratégies de maintenance tenant compte des interactions entre ces stratégies et les équipements du processus de production, la possibilité d'apporter de nouvelles stratégies de maintenance est documentée pour offrir plus de flexibilité au modèle proposé. Une approche de classification des perturbations des systèmes mécaniques a été proposée en utilisant l'outil Bond Graph, permettant la modélisation des systèmes multi-énergies en se basant sur le principe du transfert d'énergie, afin de qualifier les sources de stress causants des défaillances cachées traduisant la non linéarité du comportement des systèmes industrielles complexes.

Un cas d'étude pour application de l'approche proposée a été retenu sur une centrale thermique de production de l'électricité constituant ainsi un bon exemple des systèmes complexes vu de son environnement de forte dynamique pour garantir la continuité de service du réseau électrique national.

A la fin, les limites et avantages de l'approche sont présentées pour conclure les perspectives des futurs travaux de recherches.

Mots clés : Maintenance, modélisation, simulation, stratégies, systèmes complexes.

Abstract

Avoiding the degradation of a system even in the event of shutdown is impossible. The complexity of industrial systems makes it difficult to choose the optimal mix of maintenance strategies in such a complex environment. We have gone through the various possible sources of documentation to constitute the state of the art for modeling tools and strategy evaluation for complex systems. These models vary with the fields of activity and the complexity of the systems; they sometimes assume exaggerated simplifications that call into question the use of optimal choice.

A diagnostic study in the field was carried out to identify the needs of users and decision-makers in the field of maintenance. The selected requirements were examined with the research limitations identified to propose a generic model for simulation-based modeling, to which was added a classification and identification approach for disturbances in systems reflecting the appearance of so-called hidden failures.

The proposed model simulates maintenance strategies taking into account the interactions between its strategies and the equipment of the production process, the possibility of bringing new maintenance strategies is documented to offer more flexibility to the proposed model. A classification approach for disturbances in mechanical systems has been proposed using the Bond Graph tool, allowing the modeling of multi-energy systems based on the principle of energy transfer, to qualify the sources of stress causing hidden failures. Reflecting the non-linearity of the behavior of complex industrial systems.

A case study for application of the proposed approach was retained on a thermal power plant for the production of electricity thus constituting a good example of complex systems seen from its highly dynamic environment to guarantee the continuity of service of the national electricity network.

At the end, the limits and advantages of the approach are presented to conclude the prospects for future research work.

Keywords: Complex systems, maintenance, modelling, simulation, strategies.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des abréviations.....	vii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : MAINTENANCE ET ENJEUX DES SYSTEMES INDUSTRIELS COMPLEXES	5
Introduction.....	6
1. La maintenance des systèmes industriels	6
2. Différentes stratégies de maintenance	7
3. Modèle de maintenance	7
3.1. Modèles élémentaires	8
3.2. Modèles basés sur l'âge.....	8
3.3. Modèles de remplacement par bloc	8
3.4. Les modèles basés sur la maintenance conditionnelle	9
4. Contrôle non destructif et contrôle destructif	9
5. Modélisation des dégradations	10
6. Stratégies modificatrices (reengineering)	11
7. Complexité et Systèmes complexes	11
7.1. Notions autour de la complexité.....	11
7.2. Approche systémique pour appréhender la complexité	14
7.3. Systèmes simples, compliqués et complexes	15
7.3.1.Système simple.....	15
7.3.2.Système compliqué.....	15
7.3.3.Système complexe	15
7.4. Niveau de complexité.....	16
7.5. Exemples de systèmes complexes.....	18
7.5.1.Les systèmes matériels (industriels).....	18
7.5.2.Les systèmes informatiques.....	18

7.5.3. Les systèmes humains	18
7.5.4. Systèmes complexes et progiciel de gestion intégré	19
8. Sûreté de fonctionnement et systèmes complexes.....	19
8.1. Historique sur la sûreté de fonctionnement en industrie	19
8.2. Probabilité de l'erreur humaine en maintenance	24
8.3. Maintenance conceptuelle et systèmes complexes.....	26
8.4. Bases de données de fiabilité.....	29
8.4.1. Modèles basés sur « le part stress »	29
8.4.2. Modèles basés sur le « parts counts »	30
9. Indicateurs de fiabilité et moyen temps de bon fonctionnement	30
9.1. Temps moyen de bon fonctionnement	30
9.2. Les différentes phases du cycle de vie d'un produit	31
10. Complexité des systèmes industriels	32
11. Révolutions industrielles et maintenance	35
12. Intelligence artificielle et maintenance des systèmes complexes	37
13. Problématique & objectifs du sujet de recherche	40
Conclusion.....	43
CHAPITRE II : ETAT DE L'ART SUR LA MODELISATION ET L'EVALUATION DES STRATEGIES DE MAINTENANCE DES SYSTEMES COMPLEXES	44
Introduction.....	45
1. Méthodologie de recherche bibliographique	47
2. Synthèse de la recherche bibliographique	50
3. Statistiques des recherches retenues	51
3.1. Nombre de publications.....	51
3.2. Statistiques sur l'état de l'art des stratégies de maintenance.....	52
4. Modélisation des stratégies de maintenance.....	53
5. Techniques d'optimisation des choix de stratégies de maintenance	55
6. Algorithmes d'optimisation des stratégies de maintenance	57
7. Objectifs d'optimisation pour les systèmes de maintenance.....	57
8. Autres paramètres d'optimisation de la maintenance.....	59
9. Techniques de simulation pour l'optimisation de la maintenance	60
Conclusion.....	61

CHAPITRE III : RECENCEMENT DES ENJEUX DE LA MAINTENANCE DES SYSTEMES COMPLEXES A TRAVERS LE DIAGNOSTIC DE LA FONCTION MAINTENANCE62

Introduction63

1. Méthodologie de travail63
2. Présentation de la méthode ADEPA-CETIM64
3. Principe du diagnostic de la fonction maintenance64
4. Analyse et suggestion d'amélioration67
5. Formalisation des résultats issus du diagnostic69
6. Exploitation des résultats de diagnostic de la fonction maintenance69

Conclusion72

CHAPITRE IV : PROPOSITION D'UNE DEMARCHE POUR L'EVALUATION DES STRATEGIES DE MAINTENANCE DES SYSTEMES COMPLEXES (ESMASYC)73

Introduction74

1. Formulation du cadre de modélisation global pour l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes complexes74
2. Formalisation du modèle d'évaluation des stratégies de maintenance proposé79
 3. Modèle global de modélisation et d'évaluation82
 - 2.1. Définir les objectifs de simulation.....83
 - 2.2. Définir les paramètres de maintenance84
 - 2.3. Paramètres de maintenance choisies et algorithme d'optimisation.....86
 - 2.4. Présentation et interprétations des résultats d'aide à la décision.....88
3. Analyse des perturbations des Systèmes Complexes par utilisation des Bond Graphes91
 - 3.1. Utilisation des Bond Graphes et ses avantages91
 - 3.1.1. Besoin d'un outil pour modélisation des interactions dans les systèmes complexes91
 - 3.1.2. Avantages de l'utilisation de Bond Graph92
 - 3.2. Modèle de représentation pour Bond Graph92
 - 3.2.1. Domaines physiques et variables dans le modèle Bond Graph93
 - 3.3. Description de la nature de la perturbation dans les systèmes mécaniques94
 - 3.4. Approche de modélisation des perturbations par les Bond Graphes94

Conclusion96

CHAPITRE V : EXPERIMENTATION DE L'APPROCHE D'EVALUATION DES STRATEGIES DE MAINTENANCE : CAS DES CENTRALES THERMIQUES.....	97
Introduction	98
1. Processus de production à la Centrale thermique.....	98
1.1. Principe de fonctionnement.....	98
1.2. Description des processus principaux de la Centrale	98
2. Élaboration de l'historique des anomalies.....	103
2.1. Description du contenu du bilan.....	103
2.2. Bilan des indisponibilités de l'unité n°1	104
2.3. Bilan des équipements causant des indisponibilités.....	107
3. Suivi des Écarts de la Consommation Spécifique Nette.....	108
3.1. Intérêts du calcul des Écarts	108
3.2. Bilan des Écarts	108
4. Équipements stratégiques	111
4.1. Équipements stratégiques par rapport à l'historique des indisponibilités	111
4.2. Équipements Stratégiques par rapport à l'analyse de prévision des risques	113
5. Synthèse des résultats d'analyses aux équipements stratégiques	115
6. Évaluation des stratégies de maintenance	119
6.1. Paramétrage des données d'entrées du modèle	119
6.2. Paramètres relatifs à la maintenance	120
6.3. Autres données relatives à la sûreté de fonctionnement.....	120
Conclusion.....	121
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	122
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	126
ANNEXES.....	133
Annexe [1] : Questionnaire de diagnostic de la Fonction Maintenance (ADEPA-CETIM)	134
Annexe [2] : Logiciels de Simulation avec leurs champs d'application [132].....	139
Annexe [3] : Capabilité de modélisation par les logiciels dans le marché [132].....	144
Annexe [4] : Cas d'étude sur le système les Bond Graphs	146
Annexe [5] : Détails des recherches publiées dans le domaine.	152

Liste des figures

Figure 1: Stratégies de maintenance	7
Figure 2: modèle basée sur le changement à intervalle fixe	8
Figure 3: Système simple, compliqué et complexe [19]	16
Figure 4: Types de défaillances des systèmes.....	22
Figure 5: Schéma récapitulatif des notions maintenabilité, disponibilité et fiabilité.....	23
Figure 6: Exemple de processus de réparation d'une défaillance.....	23
Figure 7: Origines des causes de défaillances selon l'UE [33]	25
Figure 8: Sources des erreurs humaines [35]	26
Figure 9: Approche d'intégration de la maintenance conceptuelle	28
Figure 10: Modèles de prédiction et base de données de fiabilité	29
Figure 11: Courbes caractéristiques du taux de défaillance.....	31
Figure 12: Courbe en baignoire	31
Figure 13: Système série avec "n unités"	32
Figure 14: Système parallèle avec "n unités"	32
Figure 15: Système de Pont avec 5 unités.....	33
Figure 16: Système de réseau avec 9 unités.....	33
Figure 17: Système Série-parallèle avec n modules	34
Figure 18: Parallèle-Série Système	34
Figure 19: les quatre phases de la révolution industrielle. Adaptée du [44]	35
Figure 20: Exemple d'application de l'IA dans une ligne de production	38
Figure 21 : Structure d'un réseau de neurones artificiel	39
Figure 22: Logique classique et logique floue	40
Figure 23: Cadre de nos travaux de recherche	41
Figure 24: Coût d'une panne non programmée par minute dans un data-center en dollars	46
Figure 25: Distribution des publications par année	51
Figure 26: Sources de publications	52
Figure 27: Répartition des stratégies de maintenance dans la littérature	53
Figure 28: Caractéristique d'un modèle de maintenance. Adaptée du [133]	53
Figure 29: Paramètres d'un système de maintenance.....	55
Figure 30: Modèles d'optimisation.....	56
Figure 31: Optimisation mono et multi-objectives	58
Figure 32: répartition des objectifs d'optimisation.....	58
Figure 33: horizon de simulation	59
Figure 34: logistique & optimisation	59
Figure 35: Optimisation et gestion des pièces de rechanges.....	60
Figure 36: Cas d'étude dans la littérature	60

Figure 37: Techniques de simulation pour l'optimisation	61
Figure 38: logiciels de simulation pour l'optimisation.....	61
Figure 39: Graph radar du benchmarking	68
Figure 40: présentation des résultats de l'audit de la fonction maintenance	70
Figure 41: Cadre global du modèle d'évaluation des stratégies de maintenance	75
Figure 42: Cadre de modélisation et évaluation d'une stratégie de maintenance	79
Figure 43: modèle boîte noire pour l'évaluation des stratégies de maintenance.....	80
Figure 44: Élaboration de l'algorithme d'optimisation d'évaluation des stratégies de maintenance	81
Figure 45: Modèle globale de modélisation et d'évaluation	82
Figure 46: Objectifs de simulation.....	83
Figure 47: Paramètres de maintenance	84
Figure 48 : Portes dynamiques SPARE & PAND	85
Figure 49: Portes temporelles	86
Figure 50: Paramètres de maintenance et algorithmes d'optimisation.....	87
Figure 51: Présentation et interprétations des résultats d'aide à la décision.....	89
Figure 52: Schéma de principe de production de l'électricité dans une Centrale Thermique.....	100
Figure 53: Processus de production dans la Centrale	102
Figure 54: Évolution des anomalies par équipement.....	106
Figure 55: Évolution des anomalies des surchauffeurs à rayonnement de l'unité n° 01	107
Figure 56: Évolution du taux de défaillance à la centrale.....	118
Figure 57: Système masse-ressort.....	146
Figure 58: Modèle Bond Graphe du système masse-ressort.....	146
Figure 59: modélisation du système sous Simulink.....	147
Figure 60: $P(t)$ du ressort	148
Figure 61: Énergie mécanique absorbée dans l'amortisseur	148
Figure 62: Puissance $P(t)$ -deuxième cas	149
Figure 63: Énergie E_m -deuxième cas	149
Figure 64: Puissance $P(t)$ -troisième cas	150
Figure 65: Puissance $P(t)$ -régime pseudo périodique	150
Figure 66: Puissance $P(t)$ - régime apériodique	151

Liste des tableaux

Tableau 1: Exemple des Essais destructifs	10
Tableau 2: Une typologie de systèmes [10]	14
Tableau 3: les cinq niveaux de maintenance	45
Tableau 4: Liste des journaux	52
Tableau 5: Évaluation de la marche de gestion des équipements selon ADEPA-CETIM	65
Tableau 6: Grille de correction	66
Tableau 7: Résultats de l'audit de la fonction maintenance de l'entreprise B	67
Tableau 8: Résultat du Benchmarking de la gestion de la maintenance des entreprises A & B.....	68
Tableau 9: Exigences et solutions proposées	76
Tableau 10: Variables d'efforts et de flux utilisés dans les Bond Graphes	93
Tableau 11: Différents paramètres des BG dans la mécanique de translation.....	93
Tableau 12 : Différentes paramètres des BG dans la mécanique de rotation	94
Tableau 13: Modèle du bilan des événements enregistrés	103
Tableau 14: Modèle de base du bilan des indisponibilités.....	104
Tableau 15: Extrait du bilan des anomalies de l'unité 1 de production	105
Tableau 16: Extrait de l'affectation des équipements concernés par les anomalies de l'unité n°01.....	106
Tableau 17: Extrait du cumul de l'énergie non produite par équipement de l'unité n° 01	107
Tableau 18: Écarts de la CSN après la dernière révision générale	110
Tableau 19: Équipements les plus pénalisants la disponibilité de l'unité n°1	111
Tableau 20: Historique des grandes actions sur les équipements pénalisants de l'unité n°01.....	112
Tableau 21: Scénarios des différentes anomalies des équipements sur la marche de la Centrale	114
Tableau 22: synthèse des équipements stratégiques	115
Tableau 23: synthèse des actions réalisées et à planifier sur les surchauffeurs à rayonnement	116
Tableau 24: synthèse des actions réalisées et à planifier sur le circuit de vide.....	116
Tableau 25: statistiques relatives à la fiabilité des unités de production	117
Tableau 26: paramétrage des données maintenance par équipement	120

Liste des abréviations

Abréviation Signification

ACO	Optimisation des colonies de fourmis
ADD	Arbre de défaillance dynamique
ADEPA	Agence nationale pour le développement de la production automatisée
ADS	Arbre de défaillance classique
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AMDEC	Analyse des modes de défaillances et leurs criticités
ANN	Réseaux de neurones artificiels
APAVE	Association des propriétaires d'appareils à vapeur
API	Automates programmables industrielles
ATHEANA	Technique pour analyse de l'erreur humaine
BG	Bond graph
CBM	Maintenance conditionnelle
CBR	Raisonnement basé sur les cas
CD	Contrôle destructif
CETIM	Centre d'étude technique des industries mécanique
CF	Courants de foucault
CND	Contrôle non destructif
CNN	Réseau neuronal convolutif
COSNET	Laboratoire de systèmes et réseaux complexes
CSN	Consommation spécifique nette
CV	Charbon vapeur
DBN	Auto-encodeur, deep belief network
DES	Systèmes à événements Discrets
DMG	Grille de Prise de Décision
ECCS	Conférence annuelle sur les systèmes complexes
EDF	Électricité de France
ESMASYC	Évaluation des Stratégies de Maintenance des Systèmes Complexes
ESP	Programme de Stabilité électronique
FL	Logique floue
FMDS	Fiabilité, Maintenabilité Disponibilité et Sécurité
GA	Algorithmes génétiques
GMAO	Gestion de La Maintenance Assistée par Ordinateur
GPI	Progiciel de Gestion Intégré (ERP)
IA	Intelligence artificielle
ICSMB	Institut des Systèmes Complexes et de la Biologie Mathématique

Abréviation Signification

IMDR	Institut Pour la Maitrise des Risques
IMS	Systèmes de Maintenance Intelligents
IOT	Internet des Objets
ISF	Institut de Santa Fe
KBS	Systèmes Basés sur les Connaissances
LCE	Life cycle engineering
MC	Maintenance corrective
MCS	Simulation de Monte Carlo
MDT	Temps moyen d'indisponibilité
ML	Machine learning
MOOP	Optimisation multi-objective
MP	Maintenance préventive
MT	Magnétoscopie
MTBF	Moyen Temps de Bon Fonctionnement
MTTR	Moyen Temps de Réparation
MUT	Temps Moyen de Fonctionnement après Réparation de la Défaillance
OM	Maintenance opportuniste
OMF	Optimisation de la Maintenance Basée sur la Fiabilité
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PEH_m	L'erreur Humaine En Maintenance
PSF	Facteur de Mise en Forme des Performances
PT	Ressuage
REX	Retour d'expérience
RHP	Réchauffeur haute pression
RM	Réplique métallographique
RNN	Réseau neuronal récurrent (RNN)
RO	Recherche opérationnelle
RT	Radiographie
RTF	Réfrigérant à Tirage Forcé
RUL	Durée de vie Résiduelle
SA	Annelage simulé (simulated anealing)
SAGA	Annelage Simulé Avec des Algorithmes Génétiques
SBO	Optimisation Basée sur la Simulation
SD	Systèmes dynamiques
SDF	Sureté de fonctionnement
SI	Système d'information
UT	Ultrasons
VT	Contrôle visuel

INTRODUCTION GENERALE

L'adoption des stratégies optimales est parmi les défis majeurs des industriels et chercheurs dans les domaines de la maintenance. Avec l'évolution industrielle, les systèmes sont de plus en plus complexes, ce qui rend les approches classiques obsolètes dans la traduction réaliste du terrain.

Les recherches de modélisation en vue d'optimisation des stratégies de maintenance ont reçu une grande importance tenant compte des gains considérables escomptés par l'application du mix optimal des stratégies optimales.

Durant la première phase de la révolution industrielle, les opérations de maintenance ne se réalisent qu'après avoir une panne d'un équipement. Aujourd'hui ce type de maintenance classé sous la nomination de maintenance corrective. Avec l'évolution des technologies, d'autres types de maintenance ont été introduits, notamment la maintenance préventive qui vise initialement d'intervenir de façon systématique pour maintenir les équipements selon des timings préfixés même avant déclaration d'anomalies. Ceci avait pour bénéfice de garantir une meilleure disponibilité de production, par contre les frais engendrés par l'application de ce genre de stratégies sont énormes du fait que les remplacements sont faits avant la fin de la durée de vie des équipements. Et pour remédier à ces inconvénients, les chercheurs ont introduit le concept de la maintenance conditionnelle qui vise de mesurer les dégradations des pièces de rechanges pour n'intervenir qu'après avoir franchi des seuils déjà fixés et qui reflètent l'atteinte d'un niveau de dégradation avancée qui peut mener à des défaillances très probables.

L'adoption d'une telle stratégie est conditionnée par la maîtrise des paramètres intrinsèques du système. Ces paramètres sont de plus en plus dynamiques et exigent des outils de modélisation d'ordre dynamique pour mieux simuler ces comportements imprévisibles ou d'ordre complexes.

La complexité des systèmes est caractérisée par la difficulté de prédiction du comportement du système vis-à-vis des interactions entre les éléments qui le composent. Ces interactions engendrent, généralement, des changements significatifs lors de la manipulation des systèmes complexes, ce qui rend la tâche de suivi des paramètres un défi majeur des industriels et des chercheurs dans les études de sûreté de fonctionnement ou de fiabilité.

Des études de maintenance sur la fiabilité ont été introduites à la fin des années 1980 par l'utilisation des outils qui mesurent la fiabilité du système et ce pour éviter les gaspillages énormes enregistrés, surtout pour le cas des équipements stratégiques. Ces études ont été appliquées d'une manière statique dans un environnement dynamique, des années plus tard, des études ont proposé d'autres solutions pour mieux maîtriser cette dynamique.

Aujourd'hui, les approches mathématiques proposées pour simuler les stratégies de maintenance se trouvent limitées pour la reproduction de la réalité des systèmes complexes. C'est pour cela que des approches basées sur la simulation ont remplacé ces modèles pour mieux traduire les interactions complexes et aboutir à des améliorations dans la formulation des stratégies optimales.

Dans notre présent travail de recherche, nous nous sommes intéressés particulièrement au développement d'une approche permettant la modélisation et l'évaluation des stratégies de maintenance basée sur la simulation dans le contexte des systèmes complexes. Nous abordons d'abord les enjeux industriels et des généralités sur la maintenance et les systèmes complexes. Ensuite, nous présenterons l'état de l'art traitant les outils de modélisation pour l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes complexes en résumant les travaux de recherches déjà existants dans la thématique.

La troisième partie est consacrée au diagnostic de la fonction maintenance dans le contexte industriel de production de l'électricité représentant un cas pertinent des systèmes complexes. Ce diagnostic est réalisé à l'aide d'une méthode reconnue déduite des travaux de Yves Lavina. Nous allons

présenter donc, les résultats d'entretien avec les responsables et experts via des questionnaires développés pour ce but. Nous résumons cette partie par la présentation des exigences exprimées associées à ceux issues de la recherche bibliographique. Une panoplie de solutions proposées est associée pour chaque exigence.

Dans la quatrième partie, nous allons formuler l'ensemble des exigences déduit principalement des lacunes de recherche et les résultats du diagnostic de la fonction maintenance issus du terrain. La construction du cadre global de modélisation tiendra compte de ces deux types d'exigences. Le modèle est développé sous forme d'ordinogramme pour permettre une compréhension facile par les lecteurs y compris ceux qui sont non spécialistes dans le domaine. Les avantages de la simulation à travers les événements discrets sont multiples, nous citons par exemple la possibilité de suivre via une animation les étapes de simulation et également la réduction du temps de calcul en comparaison avec les approches mathématiques classiques. La prise en compte de la particularité de l'aspect dynamique des systèmes complexes est prise en compte dans notre modèle puisqu'il est conçu pour contenir également les paramètres issus du terrain. Une approche de classification des perturbations des systèmes mécaniques a été proposée à ce niveau en utilisant l'outil Bond Graph, permettant la modélisation des systèmes multi-énergies en se basant sur le principe du transfert d'énergie, pour qualifier les sources de stress causants des « défaillances intempestives ou cachées » représentant un des types de phénomènes qui gênent le bon fonctionnement des installations industrielles. Nous allons donc proposer une approche permettant d'associer le niveau technique par la proposition d'une démarche pour la caractérisation des perturbations mécaniques qui génèrent ce que l'on appelle les « défaillances cachées ».

La validation du modèle proposé est appliquée pour le cas d'une centrale thermique de production de l'électricité. Son processus de fonctionnement est détaillé et les paramètres sont regroupés pour identifier les entrées clés pour la simulation du modèle. Le choix de ce cas d'étude représentant un système complexe est motivé par la forte dynamique de ce type d'entité industrielle vis-à-vis des

changements occasionnés par la demande en électricité tout en garantissant la continuité d'alimentation en électricité.

Nous allons conclure ce présent rapport en donnant les avantages et limites de notre modèle et les futurs travaux de recherches qui constitueront les perspectives d'amélioration du modèle proposé.

CHAPITRE I : MAINTENANCE ET ENJEUX DES SYSTEMES INDUSTRIELS COMPLEXES

Introduction

L'objectif de cette première partie du rapport est de présenter les définitions nécessaires à la compréhension des termes qui seront utilisés dans la suite du rapport. Nous allons définir tout d'abord la maintenance des systèmes industriels avec ses stratégies, ensuite nous aborderons un résumé des définitions polysémiques des systèmes complexes. Les étapes de la révolution industrielle sont également présentées avec les évolutions en maintenance correspondantes. Enfin, la structure globale de présentation de la thèse est explicitée.

1. La maintenance des systèmes industriels

Tout système, même en état de repos, subit des dégradations inévitables. Les opérations de maintenance sont entreprises pour maintenir les équipements en bon état tout en délimitant les dérives critiques des performances avec celles conçues par leurs constructeurs.

Selon l'AFNOR (NF EN 13306 X 60-319), la maintenance c'est « *l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise* ».

La fonction maintenance est considérée parmi les clés majeures de la réussite d'une entreprise à bien mener les objectifs de production et de disponibilité voulus. Son importance est également motivée par le manque à gagner par faute d'application d'une stratégie optimale qui peut atteindre jusqu'à 70 % du coût total de production [1].

Les interventions de maintenance visent à garantir le bon fonctionnement des équipements tout en intervenant, soit de façon corrective c'est-à-dire après que la panne est survenue ou de façon proactive c'est-à-dire avant même que la panne survienne. Plusieurs recherches ont abordé la thématique de l'évaluation des stratégies de maintenance de façon à retenir les variables clés telles que les indicateurs relatifs à la disponibilité et la productivité des équipements. Ces variables sont généralement antagonistes avec celles issues des autres indicateurs de performances des entreprises, notamment pour ceux de la production et les coûts engendrés.

Les enjeux d'optimisation sont confrontés avec des critères qui sont souvent antagonistes. La formulation des objectifs d'optimisation, en vue de maintenir les performances nominales, est considérée parmi les préoccupations des chercheurs dans le domaine. L'aspect dynamique des systèmes industriels

rend également les recherches manuelles d'optimisation irréalistes vu les simplifications exagérées durant la formulation des fonctions objectives.

2. Différentes stratégies de maintenance

Pour garantir les performances et maintenir une bonne santé des installations industrielles, il est nécessaire de bien veiller à la mise en place des stratégies qui diminuent, voire d'éviter toute indisponibilité causée par la défaillance de l'un ou de plusieurs équipements d'un système maintenu. Ces stratégies peuvent être subdivisées totalement en trois grandes catégories (figure 1). La première s'agit de la Maintenance Corrective (MC), opérée après défaillance d'un ou plusieurs équipements causant ainsi une indisponibilité fortuite. Ce genre de stratégies étant bénéfique que dans certains cas isolés, notamment pour le cas des systèmes indépendants avec redondance active. Pour les équipements où par exemple la sûreté de fonctionnement et la sécurité est primordiale, il est inévitable d'intervenir de façon proactive pour réaliser les actions de maintenance avant l'apparition de la défaillance. C'est le cas de la Maintenance Préventive (MP) qui regroupe des politiques qui visent à garantir une fiabilité et une disponibilité meilleure tout en se basant sur des indicateurs qui sont parfois donnés par les constructeurs (le cas de maintenance systématique) ou via le suivi de l'évolution de certains valeurs mesurables (le cas de maintenance conditionnelle).

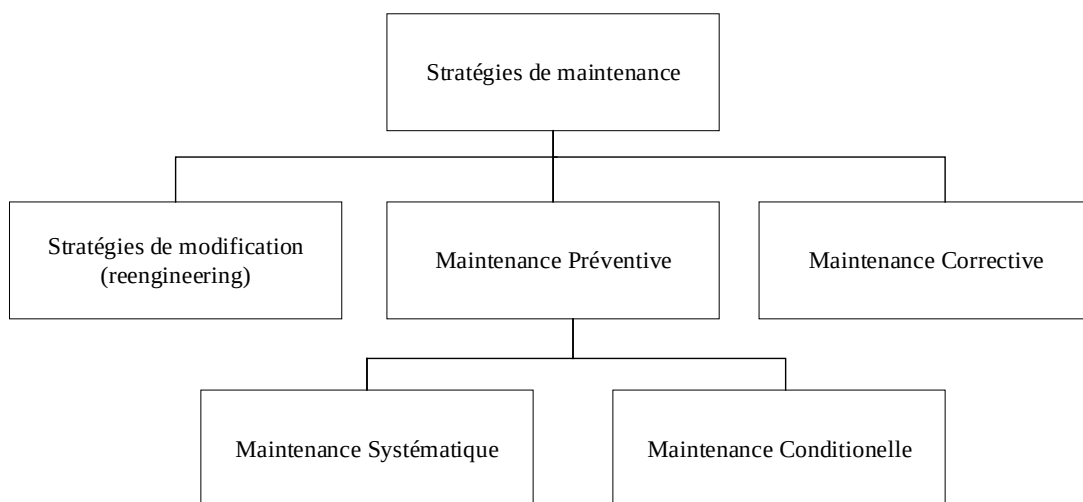


Figure 1: Stratégies de maintenance

3. Modèle de maintenance

Plusieurs modèles de maintenance ont été expérimentés pour les types de maintenance mentionnés. Ces modèles peuvent être regroupés principalement en [2] :

- Modèles élémentaires (remplacements préventifs simples) ;
- Modèles basés sur les heures de marche (temps de fonctionnement) ;
- Modèles basés sur les niveaux de dégradation ;
- Modèles basés sur les actions de maintenance préventive conditionnelle.

3.1. Modèles élémentaires

Les interventions de maintenance sont programmées de façon systématique et à intervalle fixe. Ce type de stratégie est reconnu sous la dénomination « time-based preventive maintenance ». L'intervention est alors programmée selon des échéances fixes et durant une période précisée initialement.

3.2. Modèles basés sur l'âge

Comme son nom l'indique, le remplacement s'effectue en tenant compte d'un intervalle défini ou également après défaillance du système. Le système est remplacé par un nouveau système même si la défaillance n'a pas eu lieu après l'écoulement du temps de fonctionnement défini [3]. Ce type de stratégie se trouve irréaliste puisqu'il ne permet pas d'optimiser les coûts de maintenance engendrés par cette opération de remplacement systématique. Ainsi, dans un contexte des systèmes complexes, ce type d'intervention augmente le risque lié à l'erreur humaine qui induira par conséquent à d'autres types de défaillance fortuits.

3.3. Modèles de remplacement par bloc

Contrairement au modèle basé sur l'âge, le remplacement par blocs s'effectue selon des intervalles fixes comme illustré dans la figure 2. La défaillance du système entraîne son remplacement mais n'affecte pas le programme de maintenance préventif [2].

Ce type de remplacement à intervalle fixe risque de faire des remplacements pour un matériel neuf lorsque les intervalles ne sont pas optimisés. Des recherches d'optimisation, comme les travaux d'Archibald et col. [4] proposent des approches pour mieux fixer les échéances de remplacement par bloc.

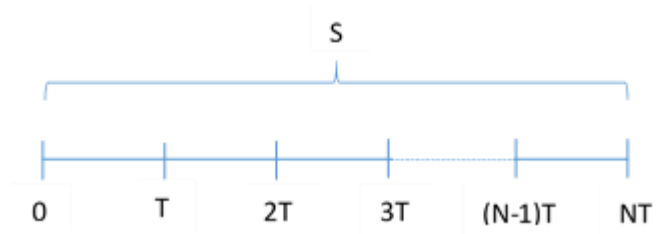


Figure 2: modèle basée sur le changement à intervalle fixe

3.4. Les modèles basés sur la maintenance conditionnelle

Avec l'avance des outils de contrôles et d'instrumentation, l'application de nouvelles stratégies ont été apparue pour augmenter la fiabilité des systèmes industriels. La maintenance basée sur la fiabilité (Reliability centred maintenance) a permis de proposer des alternatives aux modèles élémentaires par le suivi des dégradations de systèmes et de ne procéder aux remplacements qu'après avoir franchir des limites fixées traduisant ainsi l'atteinte d'un niveau de dégradation alarmant.

La surveillance des équipements figure parmi les outils de maintenance conditionnelle, les tâches de contrôle périodiques sur le système ont pour objectif de prédire selon les résultats de test effectué le reste du temps du bon fonctionnement des équipements et ce via des moyens avancés comme suit.

4. Contrôle non destructif et contrôle destructif

Le Contrôle non destructif désigne de façon générale toutes les méthodes ou techniques qui visent à caractériser l'état d'une pièce ou d'un matériau (mesure de paramètres physiques, détection et dimensionnement de défauts, etc.) sans porter atteinte à son intégrité.

Ces techniques sont utilisées au niveau industriel pour contrôler l'état de santé des pièces soit en cours de fabrication ou bien en service sous contraintes dynamique importantes. Dans les centrales thermiques, le contrôle non destructif est utilisé pour le contrôle périodique des différentes installations ainsi que l'estimation de leur vie résiduelle. Pour le contrôle périodique des équipements, les objectifs principaux de cette technique sont :

- Éviter les accidents graves liés à la sécurité du personnel et du matériel ;
- Identification des mécanismes d'endommagement ou du type de défaut corrosion, fissure ;
- Caractérisation des défauts existants (localisation, dimensions, forme, orientation) ;
- Évaluation de la durée de vie résiduelle.

A titre d'exemple, les techniques du CND les plus utilisées pour le contrôle des installations des centrales thermiques sont : Contrôle visuel (VT), Ressuage (PT), Magnétoscopie (MT), Courants de Foucault (CF), Radiographie (RT), Ultrasons (UT), Réplique métallographique (RM), la dureté (H), Mesure dimensionnel etc.

Contrairement aux techniques du CND, le contrôle destructif comme son nom l'indique est dédié pour les équipements dont l'état de santé ne peut être interprété que par intervention pour prise

d'échantillon ou sera utilisé comme éprouvette dans les essais en laboratoire comme c'est indiqué sur le tableau 1.

Tableau 1: Exemple des Essais destructifs

Exemples des essais destructifs	
- Essai de traction	- Essai d'éclatement
- Essai de dureté	- Essai de déboutonnage
- Essai de résilience	- Examen micrographique
- Essai de fatigue	- Examen macrographique

5. Modélisation des dégradations

Le choix des stratégies optimales pour la maintenance des systèmes industriels repose sur la disposition des outils adéquats pour modéliser et suivre les niveaux de dégradations du matériel maintenu. Dans un environnement dynamique, le cas des systèmes complexes en particulier, il n'est pas réaliste de supposer des états stationnaires du matériel pour effectuer les recherches d'optimisation, d'où la nécessité d'intégrer des modèles formant les courbes de dégradations rapprochées à l'état du matériel, ce qui permet de refléter la réalité du terrain pour une recherche d'optimisation adéquate. Des travaux de recherche récents comme ceux du O. Prakash et col [5] qui se sont intéressés à modéliser cette dynamique et les dégradations multiples en utilisant l'outil des Bond Graphs pour la modélisation des systèmes multi-énergies.

La détermination de la durée de vie résiduelle, en anglais *remaining useful life*, dans un environnement complexe est parmi les défis majeurs des chercheurs afin de trouver des réponses aux phénomènes de défaillances imprévues ou cachées.

Dans un environnement complexe, les modèles de dégradations classiques pour suivre les indicateurs isolés de chaque composant seul, se trouvent limités. Les dégradations multiples sont des solutions pour prédire la durée de vie résiduelle basée sur la combinaison de ces courbes de dégradations qui constituent l'ensemble du système [5]. Avec l'avancée remarquable de l'internet des objets, des modèles basés sur l'intelligence artificielle sont proposés par les chercheurs pour estimer la durée de vie résiduelle de ces équipements. Ces modèles sont regroupés principalement en quatre groupes suivants [6] : Auto-encodeur, Deep Belief Network (DBN), Convolutional Neural Network (CNN) et Recurrent Neural Network (RNN).

6. Stratégies modificatrices (reengineering)

En outre de ces stratégies, il est également possible de procéder, dans certains cas, à une stratégie de modification d'une partie du système industriel à travers le reengineering de l'installation pour retrouver les performances souhaitées d'un système maintenu.

La notion du reengineering, inventée par M. Hammer [7], se définit comme « une remise en cause fondamentale et une redéfinition radicale des processus opérationnels pour obtenir des gains spectaculaires dans les performances critiques que constituent aujourd'hui les coûts, la qualité, le service et la rapidité ». Le recours à ce type de stratégies modificatrices requiert des études d'opportunité préalables, surtout que les coûts associés sont généralement élevés, raison pour laquelle les entreprises recourent à ces stratégies en cas de prolongation de la durée de vie des équipements ou modernisation d'une partie du processus de production en défaut.

7. Complexité et Systèmes complexes

7.1. Notions autour de la complexité

La notion de la « complexité » a été née dans les années 1980 aux États-Unis dans des recherches mathématiques sur le « Chaos » ou le désordre, destinées à l'étude des systèmes dynamiques (SD) [8]. Elle a pris ensuite une notion polysémique qui rend ambiguë toute définition de ce qui est un « système complexe ». Plusieurs domaines ont utilisé la notion de complexité dans la biologie, l'informatique, l'ingénierie mais également dans la philosophie et l'épistémologie...

La notion de complexité est donc un concept subjectif, dépend de la façon dont nous le percevons. Elle est utilisée par différentes disciplines dans la littérature pour comprendre les organisations et les systèmes faisant l'objet de leurs analyses [9]. Selon Edgar Morin, sociologue et philosophe des sciences, dans son livre « *Introduction à la pensée complexe* » [10] souligne que la complexité est liée à un certain mélange d'ordre et de désordre, un mélange très intime, très différent des conceptions statiques de l'ordre/du désordre, où l'ordre (appauvri et statique) règne au niveau des grandes populations et du règne au niveau des unités élémentaires.

L'utilisation de la notion de complexité est apparue dans plusieurs domaines, nous citons par exemple :

La complexité en physique est relative aux interactions entre les grandeurs physiques dans le système ;

En informatique la notion de complexité algorithmique comme une sorte de quantification de la performance d'un algorithme ;

En industrie, les systèmes complexes, d'une vision technique ou organisationnelle, mettent en jeu des éléments hétérogènes (matériels, logiciels, acteurs humains) et leur conception fait appel à de nombreuses disciplines (mécanique, électronique, informatique, plasturgie, psychologie, etc.).

Il est souvent constaté de mélanger entre les systèmes complexes et ceux dites compliquées tels que les ordinateurs et les avions. Ces derniers se distinguent par la maîtrise des interactions entre un ensemble de composantes constituant un système. La particularité des systèmes complexes, c'est qu'ils sont imprévisibles dans le sens où la modélisation analytique du système ne reflète une reproduction réaliste du comportement du système complexe.

Partant du sens étymologique du terme « complexité » qui se présente sous deux dimensions : « globalité » et « interaction » [11].

La « globalité » renvoie à la première étymologie du mot complexe qui est "complexus", verbe signifiant "embrasser, englober". Vu sous cet angle, la complexité est alors le fait d'une réalité qui réunit ensemble, solidairement, plusieurs éléments différents.

Avec la deuxième étymologie « l'interaction », ce concept fait ici référence à l'idée de « tissé ensemble » qui insiste plus sur le lien, la relation entre les éléments.

Le concept de la globalité à lui seul ne suffit pas d'étudier la complexité des systèmes d'où la nécessité de voir également les interactions qui se font pour caractériser les comportements de ce type de système. L'étude de ces interactions vise d'apporter plus de détail que la simple relation de cause à effet dominant la science classique. Ainsi, pour mieux appréhender le sujet, une approche systémique est nécessaire. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique [12] le considère : *« une approche systémique est une approche envisageant le système comme un tout dans laquelle les interactions entre les facteurs techniques, humains et organisationnels sont dûment considérées »*.

Selon S. Page dans son livre « Diversity and Complexity » [13], les interactions entre les éléments d'un système complexe sont formées par cette hétérogénéité. Cet auteur souligne que la diversité joue un rôle différent dans un système complexe que dans un système d'équilibre, où elle ne produit souvent que des variations autour de la moyenne des mesures de performance du système.

Les chercheurs soulignent également que la qualification de la complexité d'un système ne réside pas dans la quantité d'éléments en interaction, ni de la multiplicité de relations intrinsèques, mais plutôt de l'imprévisibilité de son comportement et son dynamisme. Ainsi, nous citons quelques définitions dans la littérature :

Selon Alain Barrat du Centre de physique théorique de Marseille [8], une partie des chercheurs s'accordent pour définir un système complexe comme « *un système composé d'un grand nombre d'éléments interagissant sans coordination centrale, sans plan établi par un architecte, et menant spontanément à l'émergence de structures complexes* ».

Selon Pablo Jensen (physicien à l'ENS de Lyon) : « *les systèmes complexes se manifestent par des interactions "spontanées" entre fourmis qui font émerger l'architecture complexe de la fourmilière, entre cellules biologiques qui s'auto-organisent pour former le squelette cellulaire ou entre les supporters d'un stade qui créent une ola. Toutes ces caractéristiques sont difficiles à prédire en partant des propriétés des parties.* »

D'autres définitions autour de la thématique tentent de cerner la notion polysémique de la complexité et de ce qui est exactement un système complexe. Non seulement des conférences internationales et des maisons d'édition des journaux scientifiques ont été créées pour cet objectif, mais également des disciplines d'ingénierie et des entreprises qui développent des produits conçus pour mieux appréhender la complexité dans les systèmes outre des approches classiques, surtout linéaires.

Parmi les journaux et instituts qui traitent sur la thématique des systèmes complexes, nous citons par exemple :

Journal of Complexity (Elsevier) ; Complexity (Hindawi Limited) ; L'Institut des systèmes complexes de Paris Île-de-France ; Institut des systèmes complexes et de la biologie mathématique (ICSMB) ; Laboratoire de systèmes et réseaux complexes (COSNET); Annual Conference on Complex Systems (ECCS or CCS) ; Centre for Complexity in Business/École de commerce Robert H. Smith ,Université du Maryland; Centre pour les systèmes complexes et les sciences du cerveau CCSBS; Centre York pour l'analyse des systèmes complexes YCCSA..etc.

Des instituts comme l'institut de Santa Fe (SFI) [14] a créé un laboratoire de recherche spécialisée en 1984, pour explorer les frontières de la science des systèmes complexes. D'autres organismes comme l'Institut pour la Maitrise des Risques (IMdR) en France, organisent des groupes de travail pour débattre sur la notion et les différentes réflexions relatives à la complexité. Ainsi, l'IMdR organisent des journées intergroupes, dont celle organisé récemment (Juin 2018) avec la participation de 10 groupes de travail sous le thème « La notion d'interaction dans des approches systémiques pour appréhender la complexité» [11]. La prise en compte des différents aspects de ces systèmes requiert l'utilisation d'une approche systémique qui prend en considération le comportement d'un objet avec son environnement, contrairement aux approches qui simplifient ces relations.

7.2. Approche systémique pour appréhender la complexité

L'étude des objets dans leur complexité est possible par l'approche systémique ou également l'analyse systémique [15]. Elle permet d'appréhender l'objet d'étude dans son environnement, de son fonctionnement, dans ses mécanismes et de tout ce qui n'apparaît pas en faisant la somme de ses parties [16]. A. Yarchinovsky dans son livre « L'approche systémique : Pour gérer l'incertitude et la complexité » [17] cite que seule l'approche systémique peut apporter des explications lorsque une toute petite incertitude peut changer le tout dans un monde en perpétuel bouleversement. A. Yarchinovsky propose de revoir les objets dans une pensée systémique pour décoder les incompréhensibles et de mieux interpréter les relations complexes dans les phénomènes que nous rencontrons.

Un système signifie un ensemble organisé. Selon L. von Bertalanffy [18], un système est un ensemble complexe d'éléments en interaction. Ses éléments interagissent entre eux par des principes et des règles précis. Plusieurs types de systèmes sont utilisés dans les différents domaines tels que sociales, techniques, mathématiques, psychologiques et bien d'autres. Un système est défini principalement par :

- Sa frontière : pour délimiter les critères d'appartenance au système ;
- Sa mission : en termes d'objectifs et de raison d'être ;
- Ses interactions avec son environnement ;
- Ses fonctions : à travers l'organisation et les interactions possibles ;
- Ses ressources : naturelle, humaine, physique, immatériel etc.

Tableau 2: Une typologie de systèmes [10]

Types d'environnement	Types de systèmes
Physique	Un système hydrographique
Biologique	Un système humain
Technique	Une automobile
Idéologique	Un système philosophique
Sociologique	Une famille
Activités humaines	Un système de management

7.3. Systèmes simples, compliqués et complexes

7.3.1. Système simple

Un système simple autrement dit est un système dont les interactions entre ses éléments sont facilement identifiables et modélisables par des équations simples, voire linéaire. Son comportement est parfaitement maîtrisable et les incertitudes sont minimales pour ne pas dire inexistantes.

7.3.2. Système compliqué

Contrairement au système complexe, un système compliqué est caractérisé par la possibilité de décomposer ses éléments en deux étapes :

La première pour faire le tri en isolant ces éléments en des « notions simples »

La deuxième est pour rassembler des éléments pour arriver « difficilement » à trouver une explication au comportement du système entier.

7.3.3. Système complexe

Complexe n'est pas compliqué, lorsqu'on ne peut pas identifier et comprendre les interactions entre les éléments d'un système, ni de trouver une décomposition en sous-système pour reprendre le comportement du système, celui-ci peut être qualifié de complexe.

D'autre part, l'analyse d'un système complexe qui peut être décomposé en sous-systèmes dont la résultante est le comportement global du système entier, ce qui facilite les prévisions attendues par des moyens de calculs simples.

Nous sommes capables de comprendre et de prévoir quand et pourquoi un moteur de voiture tombe en panne alors que nous sommes incapables de comprendre et de prévoir exactement l'ensemble des facteurs qui influencent un changement ou un mouvement sociétal (exemple pour une révolution) [19].

D'une manière générale, on peut distinguer « compliqué » et « complexe » de la façon suivante :

- On utilise le terme « compliqué » lorsqu'on est capable de comprendre les interactions entre les éléments d'un système en le décomposant en morceaux ;
- On utilise le terme « complexe » lorsqu'on est incapable d'interpréter et de comprendre les interactions entre les éléments d'un système.

En conclusion : un système est dit simple lorsque sa compréhension et son interprétation sont faciles. Il devient compliqué lorsque la traduction de son comportement n'est possible qu'avec difficulté et décomposition en sous-systèmes. Dès lors, il sera considéré complexe lorsque son interprétation n'est plus

compréhensible et linéaire, son comportement global ne permet pas de maîtriser la globalité des interactions qui le composent. La figure 3 explicite quelques exemples pour mieux différencier entre ces trois notions dont compliqué et complexe sont souvent mélangées [19].

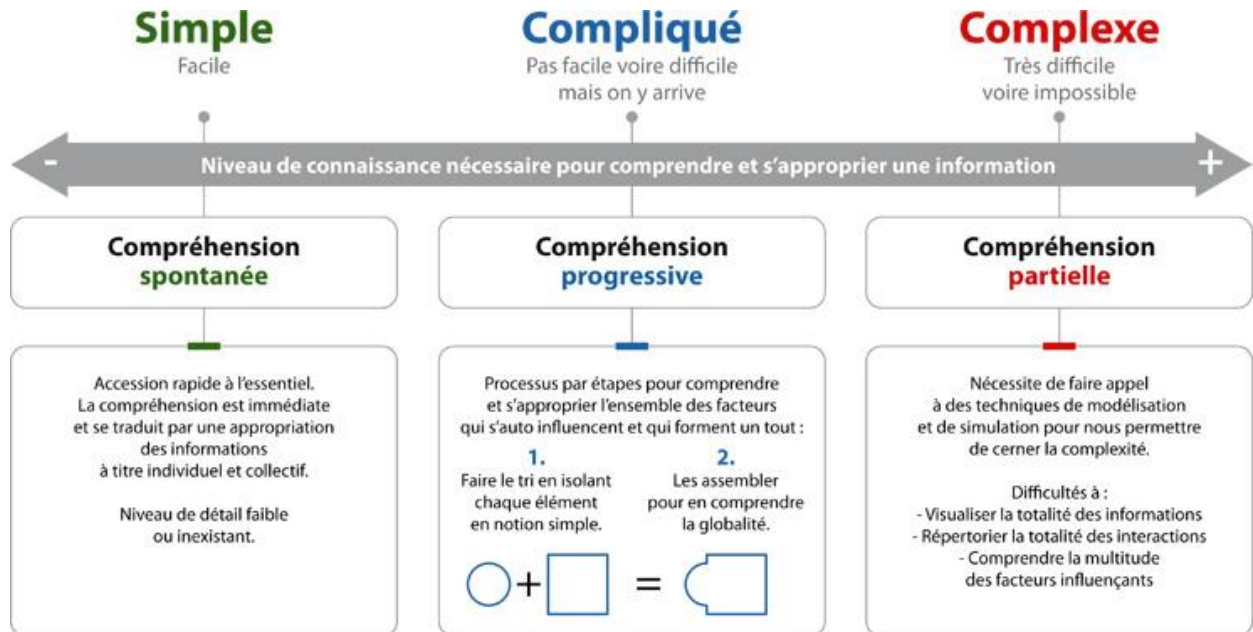


Figure 3: Système simple, compliqué et complexe [19]

7.4. Niveau de complexité

Selon une étude menée par l'Institut pour la Maîtrise des Risques (IMdR) [11], le niveau de complexité tient compte au moins de trois facteurs principaux :

- Le degré élevé d'organisation** : prenant l'exemple de la complexité constatée au niveau de l'organisation dans le nid d'abeilles vu de sa structure et des tâches confiées pour chaque abeille pour approvisionner la nourriture, prendre soin des petites abeilles et la production du miel etc.
- L'incertitude** : traduction de l'imprévisible du comportement du système complexe.
- L'impossibilité d'identifier** : les relations en jeu qui donnent lieu aux sorties du système complexe.

Selon N. **Boccara** [20] dans son livre « Modelling complex Systems », les chercheurs préfèrent de définir un système complexe comme un système formé par des agents connectés en interactions sans intervention d'un cerveau central qui gère l'ensemble, l'incertitude sur les résultats obtenus par l'interaction entre les éléments du système représente la complexité du système. Ces agents peuvent être

des insectes, des oiseaux, des entreprises...etc. Le nombre d'éléments en interaction peut commencer d'un seul jusqu'au des dizaines voire des millions.

Selon Pr. Michel Lamure [21], les principaux traits caractéristiques du comportement des systèmes complexes peuvent être résumés comme suit :

- L'existence d'un grand nombre d'agents qui interagissent localement ;
- Ils possèdent des structures internes propres ;
- Ils possèdent des mécanismes d'auto-organisation ou un comportement émergent ;
- Ils sont capables de s'adapter et d'évoluer ;
- Les incertitudes sont présentes dans ces systèmes ;
- Des phénomènes de transition de phases sont présentent ;
- Ils ont une dynamique décentralisée en plus des interactions indépendantes.

D'une façon plus générale « *Un système complexe est un ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction qui empêchent l'observateur de prévoir sa rétroaction, son comportement ou évolution par le calcul.* »[22].

Les réflexes et définitions diverses parcourues dans la littérature concernant la « complexité » et « systèmes complexes » rendent difficile la convergence vers une seule définition. C'est pour cette raison que nous allons souligner les caractéristiques de ce qui est un système complexe dans le reste du présent travail de recherche qui s'inscrit dans le cadre relatif à la maintenance des systèmes industriels complexes. Ainsi, dorénavant nous désignons comme système complexe :

- a. Un système dans le comportement est fortement dynamique de point de vue interactions entre ces éléments qui le composent ;
- b. Sa structure révèle un niveau de complexité vis-à-vis des incertitudes observées dans la maîtrise des flux de données et l'imprévisibilité de son comportement ;
- c. La modélisation de son comportement n'est pas solvable par des équations mathématiques linéaires ;
- d. La présence des phénomènes de type « défaillances cachées » qui traduisent la non-observabilité des interactions au sein des éléments du système.

Le reste des travaux dans la présente thèse, tiendra donc de ces aspects pour essayer d'apporter une contribution premièrement dans la modélisation de stratégies de maintenance dédiées pour ces systèmes, ensuite d'optimiser le choix des stratégies propices par l'évaluation de ces derniers dans le cadre d'une recherche globale dans le contexte industriel.

7.5. Exemples de systèmes complexes

Comme nous l'avons déjà cité, plusieurs définitions ont été apparues pour les systèmes complexes. Nous proposons ci-dessous quelques exemples dont figure la présence de ces systèmes par domaines :

7.5.1. Les systèmes matériels (industriels)

Il s'agit des systèmes industriels qui sont uniquement régis par des lois physiques. Un système matériel est donc un système qui transforme des variables continues ayant une interprétation physique en d'autres variables du même type. D'un point de vue mathématique, les systèmes matériels peuvent être typiquement modélisés par des comportements régis par des équations aux dérivées partielles. Un réacteur de fusée, une antenne, un système d'injection d'un moteur de voiture sont autant d'exemples de systèmes matériels.

7.5.2. Les systèmes informatiques

Il s'agit des systèmes à logiciel prépondérant dont les entrées sont essentiellement des variables discrètes et dont les sorties sont le résultat d'un traitement informatique de ces variables d'entrée. D'un point de vue plus formel, les systèmes informatiques peuvent se modéliser à l'aide des outils classiques de l'informatique (automates, formalismes logiques, etc.). Les systèmes logiciels, les systèmes embarqués, les systèmes d'information, les systèmes de contrôle-commande entrent typiquement dans cette catégorie.

7.5.3. Les systèmes humains

Lorsqu'elles sont parties intégrantes d'un système industriel, les organisations humaines doivent également être considérées comme des systèmes à part entière dans la mesure où elles sont caractérisées par des processus et donc par des comportements de type "entrée/sortie" relativement normalisés (surtout dans des contextes industriels). Bien que ces systèmes humains ne soient pas aussi facilement mathématisables que les deux catégories précédentes de systèmes, il est cependant impossible de ne pas les intégrer dans notre réflexion.

7.5.4. Systèmes complexes et progiciel de gestion intégré

De plus en plus, les entreprises doivent mettre en place une solution logicielle pour unifier son Système d'information (SI) via l'utilisation d'un Progiciel de Gestion Intégré (GPI), souvent apparu sous son abréviation en anglais ERP, et ce pour fin de maîtriser le flux des données en cours d'exploitation par les différentes corps de métier.

Ainsi, les solutions ERP aident à gérer en temps réel les interfaces entre les départements de l'entreprise telle que la gestion de la maintenance, la gestion du stock, de la production etc.

La manipulation de ces données dans un environnement complexe est considérée parmi les défis majeurs des recherches pour refléter la réalité du terrain dans le but de bien modéliser les interactions entre les systèmes dites complexes.

Nous pouvons déduire alors que l'étude d'un système complexe doit se faire dans une démarche globale qui tient compte des interactions entre ses composantes aussi bien que le couplage avec les autres niveaux et sous-systèmes pilotés par l'utilisateur.

Dans notre présent travail, nous nous sommes intéressés à la notion relative à l'étude des systèmes industriels complexes.

8. Sûreté de fonctionnement et systèmes complexes

8.1. Historique sur la sûreté de fonctionnement en industrie

Les activités industrielles, de plus en plus, à la fois compliquées et complexes font des faits marquants dans les médias lorsqu'un incident ou accident se déclenche donnant lieu à des dégâts matériels ou parfois humains catastrophiques. Les industriels et gouvernement ont réagi dès l'apparition des premiers accidents avec l'apparition des machines à vapeur en XXe siècle [23]. Pour tenter d'éliminer, voire minimiser ces dégâts à des seuils acceptables par l'opinion publique, des méthodes et outils scientifiques ont été développés pour combler les défauts responsables des accidents de toute nature. C'est ainsi que la science de l'analyse des risques industrielles a été apparue sous la discipline de la Sûreté de fonctionnement (SdF). La sûreté de fonctionnement, en anglais dependability, ou la science des défaillances et des pannes est considéré parmi les clés majeures de réussite d'une installation, elle traduit l'aptitude du système à remplir ses fonctions dont il est conçu pour, et ce dans les conditions de sécurité, disponibilité, maintenabilité et de fiabilité requises [24].

Cette notion remonte à l'ère des machines à vapeur dans le XIX^e siècle. l'Association des Propriétaires d'Appareils à Vapeur (APAVE) [25] était derrière l'officialisation des premières réglementations de sûreté de fonctionnement en France sur les machines à vapeur, ensuite elle a pris plus d'importance avec les révolutions technologiques successives, notamment en électricité, logistique, télécommunication électronique, nucléaire, aérospatial et bien aujourd'hui la révolution numérique.

D'autres définitions existent dans la littérature de la SdF relatives aux domaines d'applications par exemple : Analyse de risque dans le métier pétrolier, cyndinique (ou science de danger), aléatique et FMDS pour Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité.

La science de la sûreté de fonctionnement s'articule sur des méthodes et outils scientifiques pour quantifier les probabilités aux risques identifiés causant le cas échéant des défaillances des systèmes ou des accidents humains. Cette discipline s'implique non seulement aux systèmes déjà opérationnels, mais également au stade de conception des nouvelles solutions avant implantation dans le terrain.

Introduite dans les années 60, la méthode FMDS traduites en anglais par RAMS (Reliability, Availability, Maintainability et Security) prend en considérations les quatre principaux axes pour évaluer les risques probables d'un système de réévaluer les risques en cas de modifications (reengineering) d'une installation. Ces composantes peuvent être définies comme suit :

La Fiabilité : c'est la probabilité de la non-défaillance d'un équipement donné sur un intervalle de temps déterminé. Selon les normes AFNOR : la fiabilité c'est « *l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné* » (NF EN 13306) ou également « *la caractéristique d'un bien exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné* » (NF X 60-500)

La maintenabilité : selon l'AFNOR c'est : « *dans les conditions données d'utilisation, l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits* ». Le système est considéré réparable pour pouvoir effectuer une opération de remise en état. Deux types d'approche de réparation possibles, la première est connue en anglais comme « as good as new » pour une réparation aussi bonne que neuf, et la deuxième « as bad as old » pour évoquer une réparation du matériel dans un état de fonctionnement avant innervation de maintenance aussi mauvais que vieux.

La disponibilité : pour évaluer la probabilité d'un système pour accomplir ses fonctions requises dans un intervalle de temps ou un instant donné. La disponibilité tient compte alors de la fiabilité et la maintenabilité pour être quantifiée selon l'équation suivant :

$$Disponibilité = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

MTBF : Moyen temps de bon fonctionnement (actions sur la fiabilité)

MTTR : Moyen temps de réparation (actions sur la maintenance)

La Sécurité : pour décrire les conditions prises en compte pour évaluer principalement la sécurité des utilisateurs en répondant aux réglementations en vigueur.

C'est dans les années 1970 que les normes relatives à la fiabilité des installations industrielles ont été serrées pour quantifier au mieux les probabilités liées aux risques industrielles afin de les éliminer ou éviter au maximum. En 28 Mars 1979, un accident a été survenue dans la centrale nucléaire de Three Mile Island aux Etats-unis [26], qui ne fit heureusement aucune victime, mais donnant lieu à des conséquences lourdes dans l'opinion publique, ce qui a conduit à renforcer les études de fiabilité dans l'industrie. Selon l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), cet accident a été le point tournant dans le développement considérable dans le domaine de nucléaire et des réglementations de la sûreté de fonctionnement en particulier.

Avec l'apparition des outils de l'informatique industrielle, des méthodes d'évaluation des risques ont été développées tenant compte des facteurs humains tels que les chaînes de Markov, Réseaux de Pétri, Simulation à événements discrets, HEART (pour les facteurs humains) ...

Des phénomènes catastrophiques ont été enregistrés dans l'histoire de l'industrie causant parfois des dégâts humains que matériels comme celui d'une usine de pesticides à Bhopal en Inde (1984) qui a causé 2000 victimes ; deux années plus tard, une explosion a été survenue au cœur du réacteur nucléaire à Tchernobyl qui a conduit à des fuites radioactives dangereuses.

La défaillance est définie comme la cessation d'un équipement à accomplir sa fonction requise tel qui l'est conçu dans les spécifications techniques nominales. L'identification et la classification des défaillances dans un arbre de défaillance permet de cerner les causes racines liés aux risques de non-fonctionnement d'un système, des méthodes tel que l'analyse des modes de défaillances et leurs criticités (AMDEC) a pour but d'analyser, dans une optique de formalisation de retour d'expérience (REX), les effets des défaillances sur un système et leurs criticités.

Avec l'évolution technologique dans les systèmes industriels où la complexité est caractérisée par des comportements non linéaire des systèmes complexes, les études de sûreté de fonctionnement ont connues de nouvelles limitations liées à la forte dynamique de ce type de systèmes et la difficulté de modélisation globale des scénarios probables par la sommation des scénarios de ces composants

élémentaires. Les types de défaillances peuvent être classifiés principalement sous les catégories suivantes (figure 4) :

- **Défaillance progressive** : où la dégradation normale du système conduira à sa défaillance avec le temps de sa conception. C'est le cas habituel des équipements mécaniques.
- **Défaillance aléatoire** : qui peut surgir aléatoirement de son état normal à celui défaillant, c'est le cas généralement des équipements électroniques ou informatiques.
- **Défaillance soudaine** : dit également caché, où la défaillance est survenue intempestivement même après avoir effectué toutes les précautions et opérations de maintenance comme il faut.

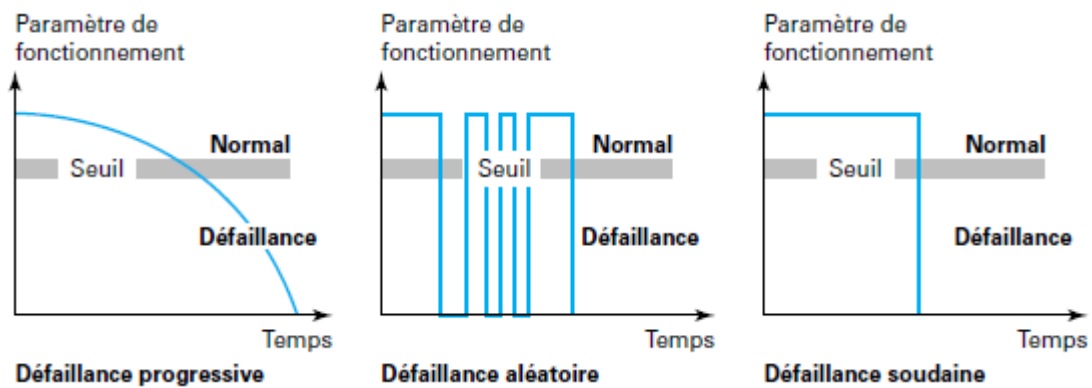


Figure 4: Types de défaillances des systèmes

Une analyse FMDS a pour but de maîtriser les sources de risques de non-fonctionnement, de minimiser le risque et également d'éviter les dégâts humains causés par les accidents dans le terrain. Ainsi, la disponibilité, la maintenabilité et la fiabilité sont définies selon la figure 5 par les relations suivantes :

- MTTF : Moyen temps de déclenchement d'une défaillance (Mean time to failure) ;
- MTBF : Moyen temps entre deux défaillances successives (Mean time between failures) :
 - MDT : Temps moyen d'indisponibilité (Mean down time)
 - MUT : temps moyen de fonctionnement après réparation de la défaillance (Mean up time).

$$MTBF = MDT + MUT \quad (2)$$

La disponibilité asymptotique est déduite par la relation : $A_{\infty} = \frac{MUT}{MTBF}$

L'intervention des équipes de maintenance pour la réparation d'une défaillance dans le cadre de la maintenance corrective, pour les équipements non redondants, est gérée par une chronologie définie partant du l'apparition de la défaillance jusqu'à la remise en service de l'équipement concerné. La gestion

optimale des interactions entre ces délais favorise la performance des équipes et la maîtrise des situations de crise d'indisponibilité.

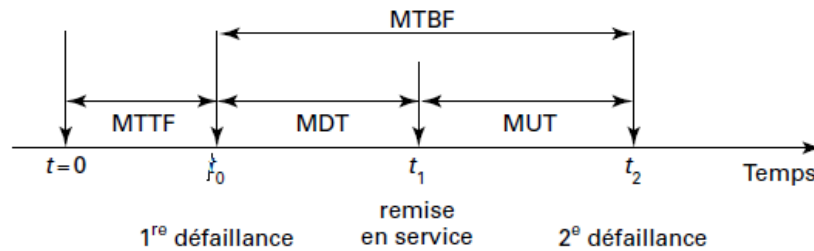


Figure 5: Schéma récapitulatif des notions maintenabilité, disponibilité et fiabilité

Avec l'apparition d'une défaillance à l'instant t_0 , un délai de diagnostic de la nature de la défaillance est nécessaire pour bien localiser et fournir les informations qui vont être utiles pour prendre les décisions stratégiques selon les règles techniques et administratives, après quoi l'intervention commence selon les consignes d'exploitation qui définissent aussi des limites obligatoires, notamment pour les installations sous pression ou sous des températures élevées qui se refroidissent selon les préconisations du constructeur.

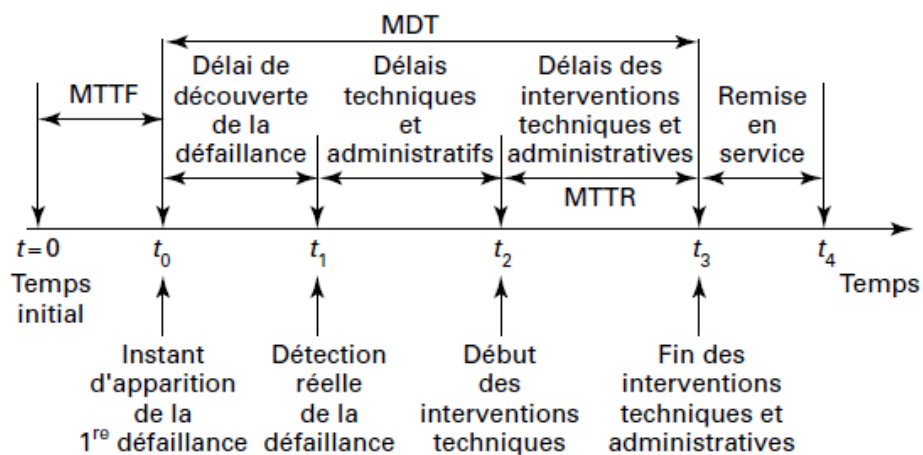


Figure 6: Exemple de processus de réparation d'une défaillance

Le temps d'intervention varie selon les moyens disponibles, les pièces de rechanges nécessaires, le niveau de maintenance à encourir qui dépend des compétences du personnel selon le niveau d'expertise définie par la direction. L'indisponibilité des pièces de rechanges est considérée parmi les lacunes fréquentes lors des interventions des équipes vu que les politiques de gestion de stock considèrent la possession d'un matériel en stock sans utilisation durant une période donnée est une source de perte d'argent. Des modèles qui tiendront compte de la durée de vie des équipements et leurs temps

d'approvisionnements avec les quantités optimales est un axe de recherche en développement grâce aux nouvelles techniques de l'internet des objets (IoT) et les outils de diagnostic déterminant des approximations de la durée de vie résiduelle des équipements névralgiques causant des durées énormes en cas de leurs indisponibilité.

Le temps moyen de disponibilité de l'équipement dépend alors de l'efficacité des interventions encourues. Cet aspect connaît des variations parfois énormes à cause des erreurs humaines qui peuvent être induites par le personnel de maintenance, ce qui favorisent le déclenchement des défaillances bien avant les périodes de maintenance préventives prédéfinies selon les stratégies applicables.

La prise en considération de l'erreur humaine (human error) dans les modèles d'optimisation des stratégies de maintenance est généralement négligée. Des recherches ont pris en considération cet aspect en modélisant la « fiabilité humaine ».

8.2. Probabilité de l'erreur humaine en maintenance

La probabilité de l'erreur humaine en maintenance (PEH_m) est calculée initialement par des méthodes comme celle développée par Cooper et col. [27] appelé ATHEANA (A Technique for Human Error Analysis) préparé pour la commission de réglementation nucléaire des États-Unis (US. NRC) publié en proposant les bases techniques et une méthodologie de diagnostic qui permet :

- L'identification d'un événement de défaillance humaine (HFE) ;
- L'identification d'une action dangereuse associée au HFE ;
- L'identification d'un contexte de forçage d'erreur (EFC) associé à l'action non sécurisée ;
- L'estimation des probabilités pour chaque EFC ;
- la quantification du HFE à l'aide des probabilités EFC estimées.

La méthode HEART [28] (Happiness, Engagement, Adoption, Retention, Task success), développée par Williams en 1986 est utilisée pour l'identification de la PEH en se basant sur le niveau d'exigence des tâches, les risques inhérents liées aux tâches et les possibilités de récupération des erreurs humaines.

L'importance derrière la prise en compte de la probabilité de l'erreur humaine est motivée par le fait que plus de 50% des causes de défaillances, comme explicité dans la figure 7, est à l'origine des facteurs humains et organisationnels selon l'UE (2002). Les méthodes développées pour cerner cette variabilité humaine ont été initialement consacré à l'étude de l'erreur humain comme un individu parmi les éléments des systèmes [29], ensuite des travaux de nouvelle génération considère des approches utilisant les facteurs humains cognitifs dans une optique de Lean management. I. Tajri et A. Cherkaoui

[30] ont fait le tour sur les modèles d'application de stress en prenant la dualité « performance-stress » pour les systèmes complexes, ainsi cette recherche a révélé le rôle de l'ergonomie cognitive dans l'amélioration des performances de l'entreprise et la meilleure adéquation entre l'environnement Lean et l'espace cognitif des employés grâce à des aides cognitives. M. S. Bajjou et A. Chafi [31] ont montré dans le domaine de la construction l'importance de l'application du « Lean construction » pour augmenter la productivité tout en assurant un niveau de sécurité meilleur dans les chantiers de construction, ces techniques sont encore dans leurs premiers stades d'application par les industries concernées. Des résultats remarquables pour la gestion performance des projets similaires ont été enregistrés en évitant les sources de gaspillages identifiées [32]

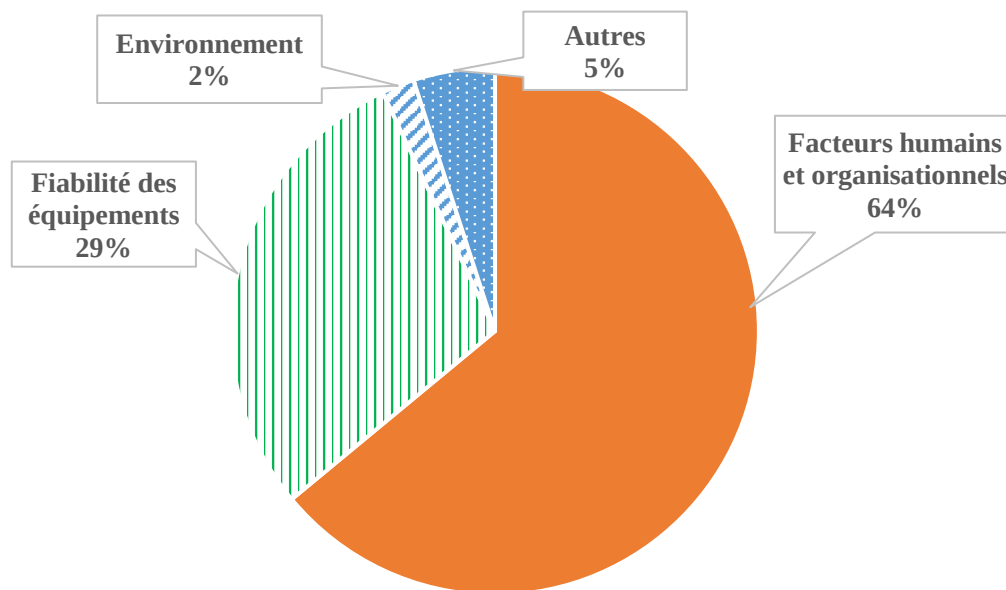


Figure 7: Origines des causes de défaillances selon l'UE [33]

La probabilité de l'erreur humaine est bien beaucoup plus élevée en maintenance pour les opérations sur les systèmes complexes. La prise en compte des risques engendrés par les erreurs humaines a retenu l'intérêt des chercheurs en se basant sur les différents axes de recherches y compris la psychologie des équipes de maintenance et l'environnement de travail...

T. Toriizuka [34] a considéré que le comportement humain doit être évalué selon un facteur de mise en forme des performances (PSF), en anglais performance shaping factor. Dans cette étude effectuée sur une centrale nucléaire, il a regroupé les risques liés à l'erreur humaine en classifiant ces derniers en huit catégories : (1) charge de jugement, (2) charge physique, (3) charge mentale, (4) information et confirmation, (5) indication et communication, (6) machines ou outils, (7) environnement et (8) espace de travail.

Une classification a été proposée par Aju et Gandhi (figure 8) [35] pour les sources liées à l'erreur humaine en trois catégories : (1) erreurs liées aux compétences, (2) erreurs de décision et (3) erreur de perception auquel s'ajoute trois catégories pour les violations : (1) routine, (2) situationnel et (3) Exceptionnel.

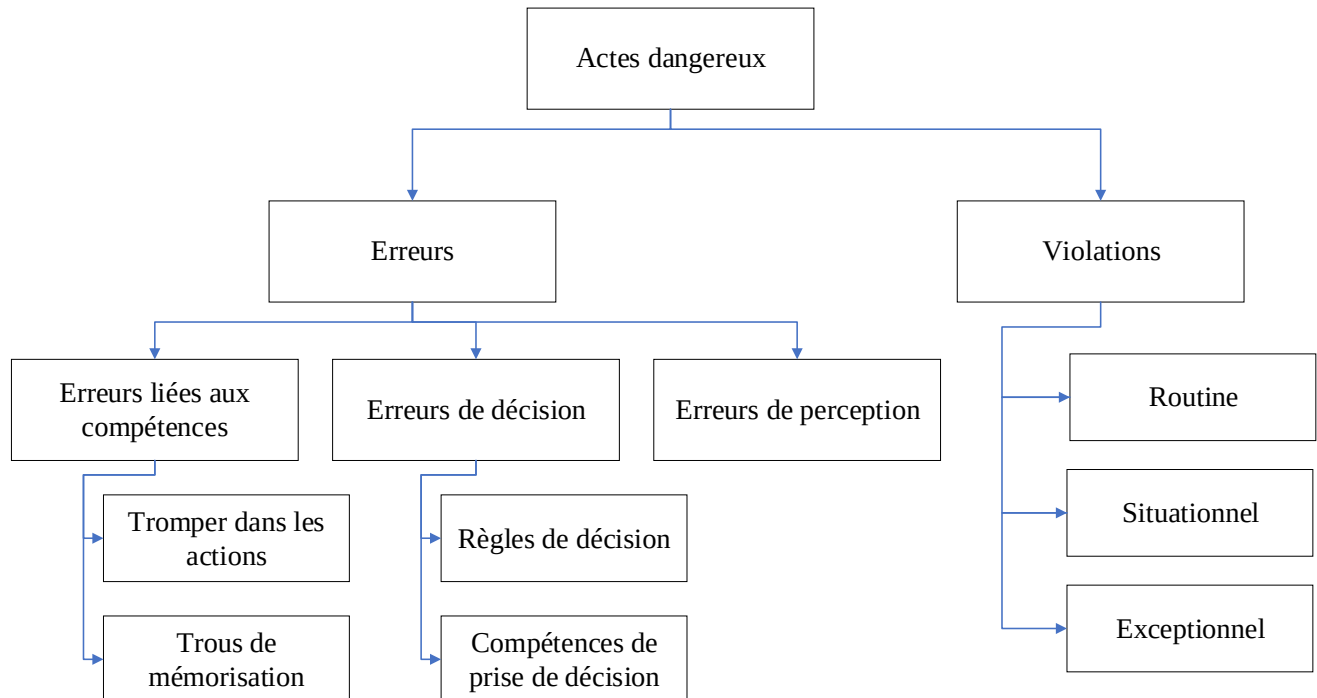


Figure 8: Sources des erreurs humaines [35]

SM. Asadzadeh et col. [36] proposent d'intégrer l'erreur humaine dans l'optimisation de la maintenance conditionnelle en se basant sur la simulation des niveaux de dégradation normales en comparaison avec les données issues de la supervision des indicateurs de mesures des paramètres de marche des équipements.

L'approche de modélisation systémique de SM. Asadzadeh [36] s'articule sur la simulation de Monte Carlo pour les dégradations et les diagnostics/ Algorithme de pronostic pour ensuite récupérer ses données dans une simulation à événements discrets qui déterminera le coût moyen unitaire à optimiser par l'algorithme de Fibonacci.

8.3. Maintenance conceptuelle et systèmes complexes

Pour garantir les bons résultats de sûreté de fonctionnement, il est possible d'effectuer une analyse de FMDS tenant compte de l'aspect de la maintenance au stade de conception. C'est ce qu'on appelle la maintenance conceptuelle [37]. Les exigences relatives à l'exécution des interventions pour maintenance

sont prises en considération pour réduire le temps de démontage pour les pièces qui subissent les dégradations remarquables par rapport à la durée de vie résiduelle de l'installation maintenue. La figure 9 résume l'approche générale d'intégration de la maintenance conceptuelle au stade de conception des équipements industrielles [38].

Cette approche étant divisée en deux parties dont la première est dédiée pour la prise en compte des spécifications techniques et exigences du cahier des charges pour ensuite définir les indicateurs liés à la maintenabilité, la fiabilité et la durée de vie du matériel conçu. La deuxième étape consiste à préciser les gammes de maintenance à entreprendre pour garantir les performances nominales de conception du matériel tout en respectant les paramètres de marches adéquates selon les préconisations du constructeur.

La formalisation d'une optimale politique de maintenance à travers son intégration en stade de conception requiert l'intervention de plusieurs acteurs y compris le recensement du retour d'expérience formalisé dans le but de rattraper les erreurs de conception ou les conditions limites d'utilisation du matériel.

Dans un environnement complexe où les méthodes classiques de modélisation se retrouvent limitées pour prédire le comportement du matériel maintenu, les industriels et chercheurs optent pour le recours à des outils de simulation et de modélisation modernes tel que les bonds graphs pour les systèmes multi-énergies, d'ordre complexe. Ainsi, une recherche d'optimisation uni-critère des sous éléments du système complexe ne reflète pas son comportement général à cause de la non-linéarité de dépendance entre ces éléments.

Des industriels ont mis en application des plateformes pour la gestion décentralisée de la maintenance pour les installations similaires dans le but de favoriser la proactivité des services maintenance par la fiabilisation des gammes de maintenance en se basant sur la collecte et le tri des données issus de la supervision des installations en exploitation. Des outils de diagnostic tel que les méthodes de contrôles non destructifs et destructifs permettent de renforcer ces bases de fiabilité des systèmes complexes. Les méthodes telles que l'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leurs criticité (AMDEC) est exploitée pour localiser les causes racines des défaillances des moyens de production tout en impliquant le personnel qualifié pour l'analyse de la criticité et des effets des défaillances rencontrées pour pouvoir agir prochainement de façon proactive, ce qui contribue à la fiabilité et la disponibilité des moyens de production.

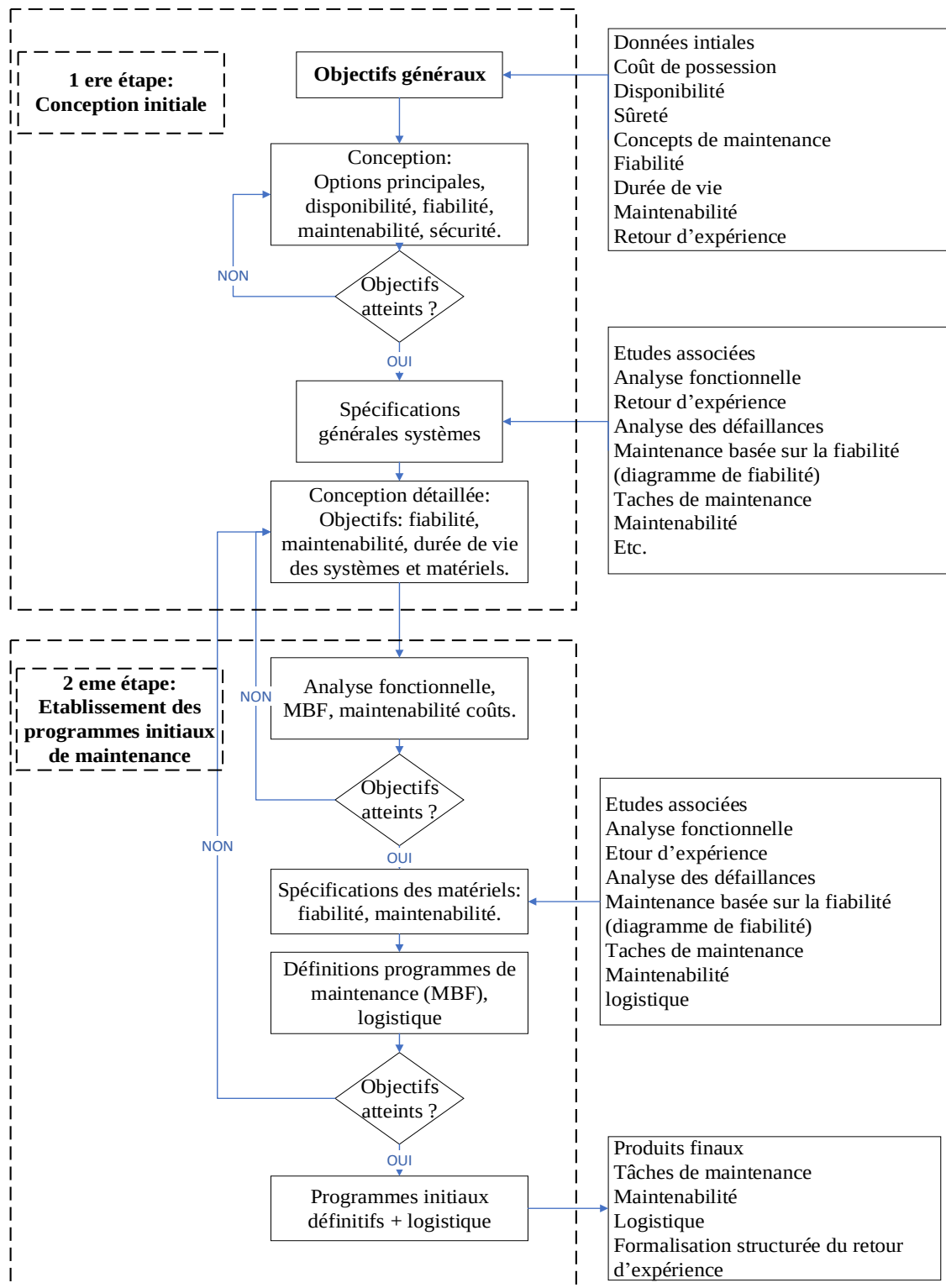


Figure 9: Approche d'intégration de la maintenance conceptuelle

8.4. Bases de données de fiabilité

Une des méthodes de fiabilisation de la sûreté de fonctionnement des installations, est de calculer le taux de défaillances moyens en se basant sur les données de chaque composant. Ces méthodes s'appliquent généralement sur les circuits électroniques que ceux mécaniques.

Les constructeurs des pièces fournissent une base de données des conditions optimales d'exploitation des composantes avec les valeurs limites de sécurité, ce qui permettra de simuler via des logiciels préconçus, les taux de défaillance ou le degré de fiabilité attendu lors du fonctionnement du système. La figure 10 résume l'exploitation des bases de données et les modèles de prédiction pour le calcul approximatif du taux de défaillance d'un système complexe.

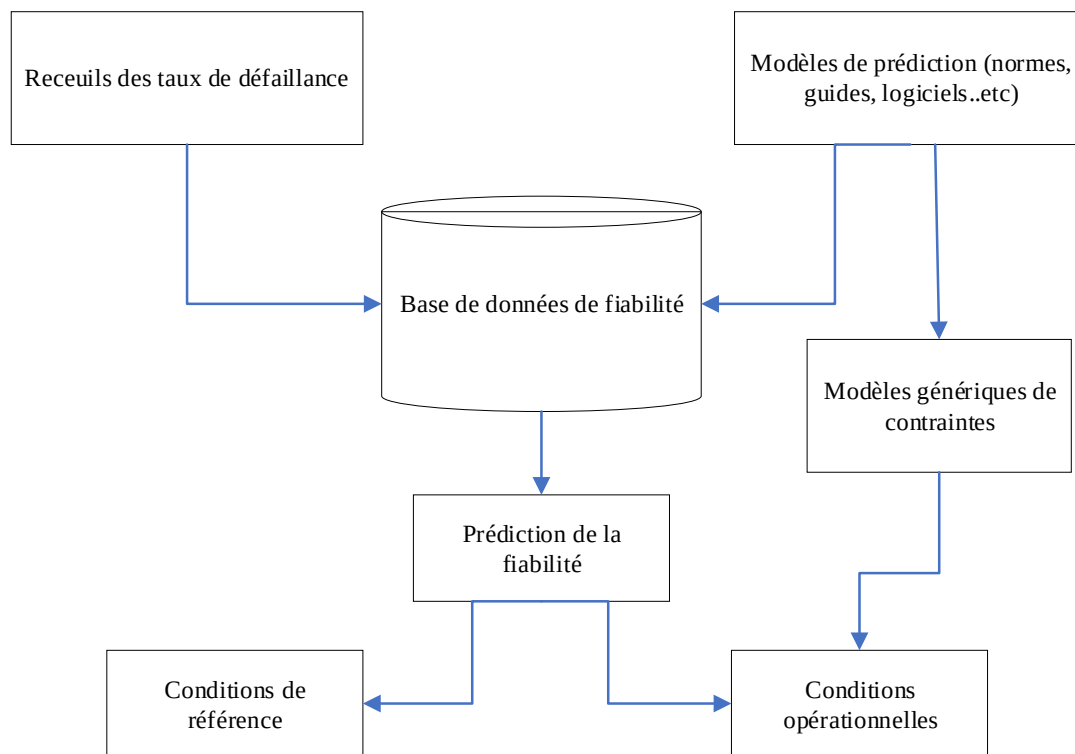


Figure 10: Modèles de prédiction et base de données de fiabilité

Selon G. Zwingelstein [39], ces modèles se divisent en deux catégories :

8.4.1. Modèles basés sur « le part stress »

Ces modèles s'appliquent sur des circuits électroniques en fin de durée de vie pour connaître précisément les types de contraintes qu'a subi chaque composant et les niveaux de dégradation constatées après un nombre d'heure de marche cumulé. Ces constats sont rapprochés aux conditions de travail de ces

composants tel que les conditions climatiques et les événements spéciaux enregistrés durant la phase de son exploitation industrielle.

8.4.2. Modèles basés sur le « parts counts »

Contrairement au modèle part stress, le modèle « parts counts » s'applique durant la phase de conception des systèmes. Les informations retenues se limitent aux données de conception des composantes en ajoutant des conditions de travail prévues en phase d'exploitation. La moyenne des taux de défaillances définira ainsi une approximation globale de la fiabilité du système entier.

9. Indicateurs de fiabilité et moyen temps de bon fonctionnement

Précédemment le taux de défaillance λ a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimer par une expression physique. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances.

$$\lambda = \frac{\text{nombre total des défaillances pendant le service}}{\text{durée totale de bon fonctionnement}} \quad (3)$$

9.1. Temps moyen de bon fonctionnement

Le MTBF (Mean Time Between Failure) est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie t .

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps

$$MTBF = \frac{\text{Somme des temps de fonctionnement entre les (n) défaillances}}{\text{Nombre d'intervention de maintenance avec immobilisation}} \quad (4)$$

Si λ est constant : $MTBF = \frac{1}{\lambda}$. Par définition le MTBF est la durée de vie moyenne du système.

La figure 11 montre l'évolution du taux des défaillances pour les différentes entités :

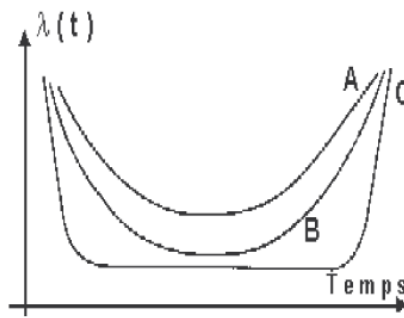


Figure 11: Courbes caractéristiques du taux de défaillance

Les courbes ont une forme générale dite en baignoire (figure 12), mais présentent néanmoins des différences suivant la technologie principale du système étudié :

- A. en mécanique ;
- B. en électromécanique ;
- C. en électronique.

9.2. Les différentes phases du cycle de vie d'un produit

L'évolution du taux de défaillance d'un produit pendant toute sa durée de vie est caractérisée par ce qu'on appelle en analyse de fiabilité la courbe en baignoire. Le taux de défaillance est élevé au début de la vie du dispositif. Ensuite, il diminue assez rapidement avec le temps (taux de défaillance décroissant), cette phase de vie est appelée période de jeunesse. Après, il se stabilise à une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible pendant une période appelée période de vie utile (taux de défaillance constant). A la fin, il remonte lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets, c'est la période de Vieillessement (taux de défaillance croissant) :

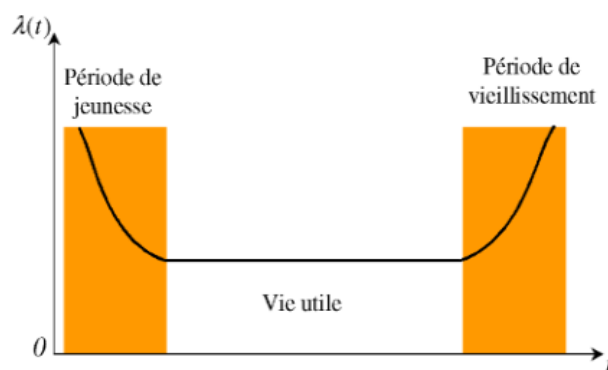


Figure 12: Courbe en baignoire

10.Complexité des systèmes industriels

Les systèmes industriels sont de plus en plus complexes vis-à-vis des processus et les équipements installés. Ces différentes topologies de réseaux existantes dans l'industrie rendent sa modélisation difficile. Ce qui mène à des simplifications exagérées lors de l'évaluations des indicateurs dans une démarche d'optimisation [40]. Nous explicitons ci-dessous les différentes structures des systèmes et les caractéristiques correspondantes :

10.1. Systèmes série

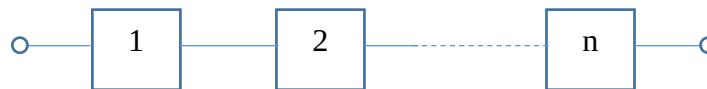


Figure 13: Système série avec "n unités"

Système série : composé de n unité avec un seul chemin. L'ordre de complexité du système égale à 1 quel que soit le nombre de n unités.

10.2. Système parallèle

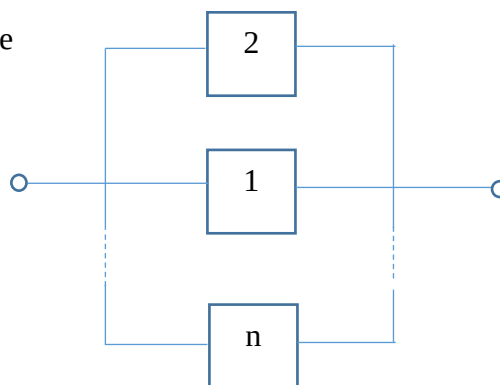


Figure 14: Système parallèle avec "n unités"

Système parallèle : le nombre de chemin possible d'un système parallèle de n unités égale à n. la complexité est alors $P_a=n$.

10.3. K-Sorties du n-systèmes

Considérant un système k sur n peut fonctionner si au moins k unités fonctionnent.

L'ordre de complexité est $P_a = \binom{n}{k}$ parce que le nombre de chemins est $\binom{n}{k}$.

10.4. Système de secours (Standby)

Le nombre de chemins d'un système de secours dans lequel une unité est en fonctionnement et $n-1$ unités en veille est supposé égal à celui d'un système en parallèle. La complexité est $P_a = n$.

10.5. Système de Pont

Le nombre de chemins d'un système de pont avec 5 unités dans la figure 15, et par conséquent, sa complexité est $P_a = 4$.

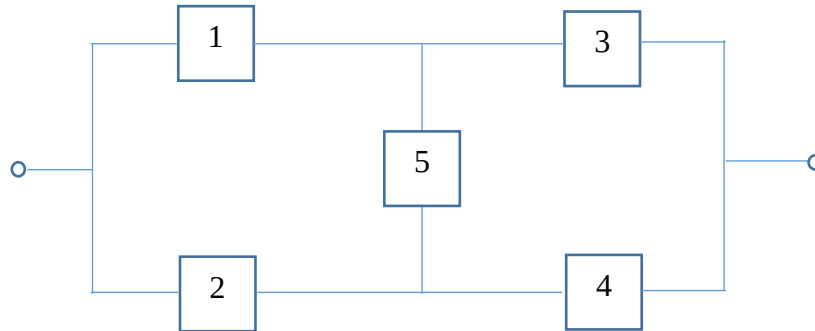


Figure 15: Système de Pont avec 5 unités

10.6. Système de Réseau

Le nombre de chemins d'un système de réseau à 9 unités est de 10, et sa complexité est donc $P_a = 10$.

Supposons ensuite qu'un système est composé de plusieurs modules dont chacun est composé de plusieurs unités et de la complexité du module M_j ; est $P_a(j)$ ($j = 1, 2, \dots$).

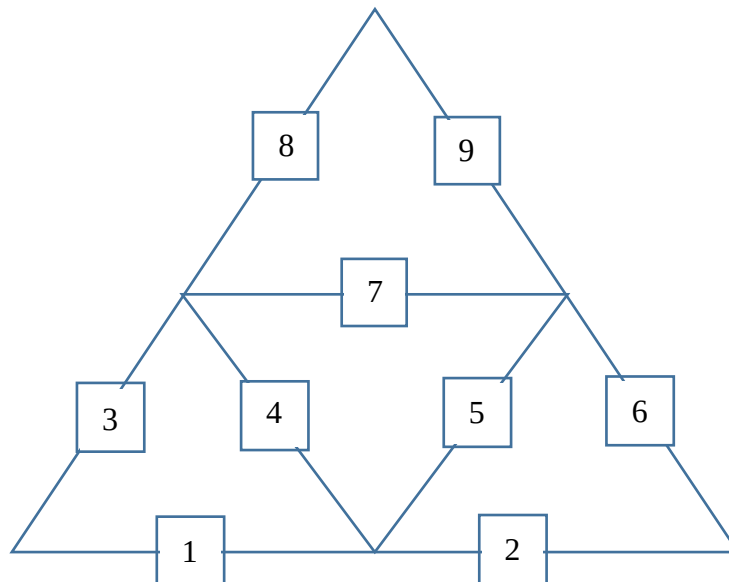


Figure 16: Système de réseau avec 9 unités

10.7. Système Série-parallèle avec n modules

Le nombre des chemins est de $\prod_{j=1}^m Pa(j)$. La complexité du système est $Pa = \prod_{j=1}^m Pa(j)$, c.-à-d., il est donné par le produit de la complexité de chaque module. Par exemple, la complexité d'un système série-parallèle dans la figure 17 est $Pa = n^m$.

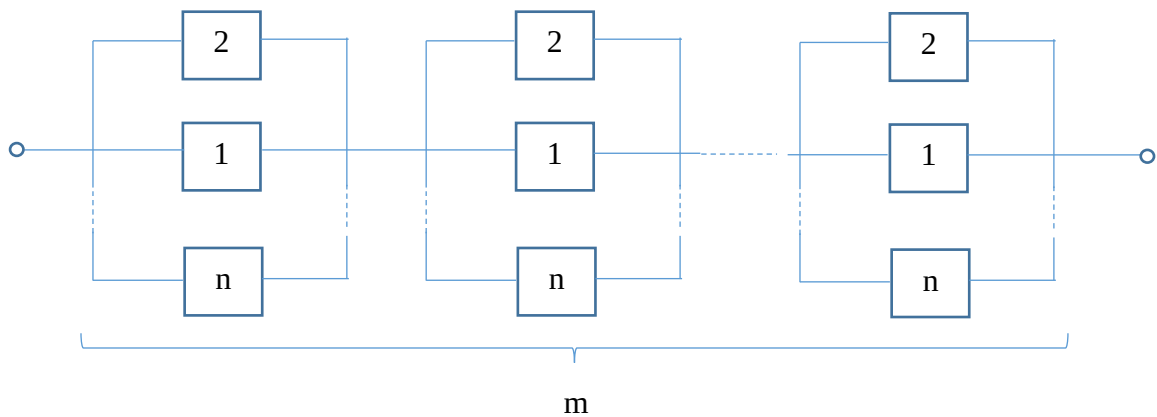


Figure 17: Système Série-parallèle avec n modules

10.8. Système Parallèle-série avec n modules

Le nombre de Chemins est de $\sum_{j=1}^m Pa(j)$. La complexité est donc $Pa = \sum_{j=1}^m Pa(j)$, c.-à-dire il est donné par la somme des complexités de chaque module. La complexité d'un système de parallèle- série illustrée ci-dessous est $Pa = m$ indépendant de n.

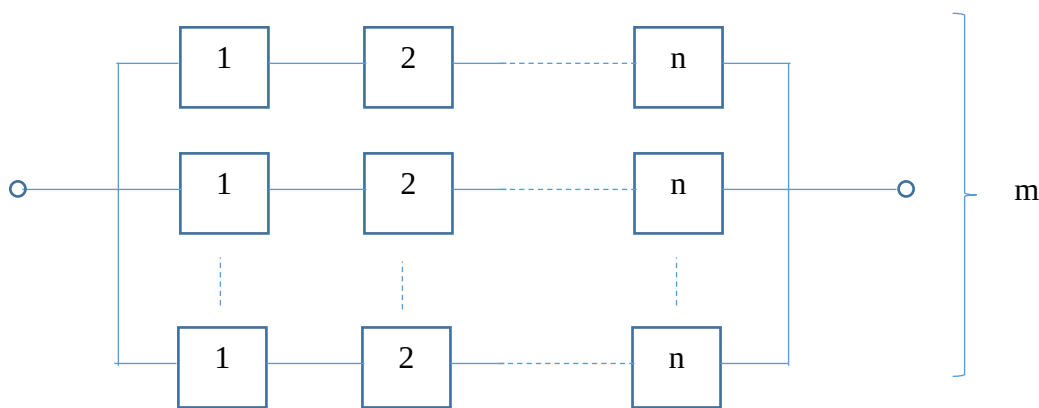


Figure 18: Parallèle-Série Système

Un système industriel peut regrouper deux ou plusieurs de ces différentes typologies ce qui rend la tâche d'optimisation plus, surtout avec une fonction objective multicritère.

11. Révolutions industrielles et maintenance

Les systèmes de maintenance évoluent de manière significative, passant d'une fonction classique à un service stratégique pertinent, car le coût est fortement comptabilisé lorsque quelque chose ne va pas. La fourchette des coûts de maintenance varie entre 15% et 70% du coût total de production [41]. L'article de statistique publié par Tom Dabbs [1] souligne que le prix d'achat des équipements tournants ne représente qu'environ 10 à 25% des coûts de production total alors que les coûts d'énergie, d'entretien et d'exploitation représentent 75 à 90%.

Ceci fait de l'optimisation de la politique de maintenance l'un des défis majeurs de la recherche. Une grande attention est accordée à la création d'outils d'optimisation de la maintenance plus réalistes, couvrant également la complexité du système réel considéré comme complexe. Il existe de nombreux problèmes théoriques et pratiques sur la complexité des systèmes classés en série, en parallèle et en pont avec n unités. D'autres sont des systèmes mixtes série-parallèle ou série-parallèle et réseaux. Grâce à l'intégration des techniques informatiques, à la mise en réseau et au contrôle avancé sophistiqué, les usines sont plus efficaces pour fournir des informations pertinentes afin de surmonter certaines des contraintes rencontrées, telles que "les défaillances cachées" [42]. Ceci est minimisé en explorant les avantages d'outils de surveillance tels que le « diagnostic de vibrations », le « contrôle non destructif », etc.

Récemment, la quatrième génération de la révolution industrielle, intitulée Industrie 4.0 [43], présente diverses applications faisant également appel à de nouveaux termes techniques, tels que l'Internet des objets, l'Internet des objets industriels, l'analyse de données volumineuses, les machines intelligentes, etc. autres. L'intelligence artificielle (IA) est également utilisée pour en inclure le bon usage. La figure 19 résume les quatre principales phases de la révolution industrielle :

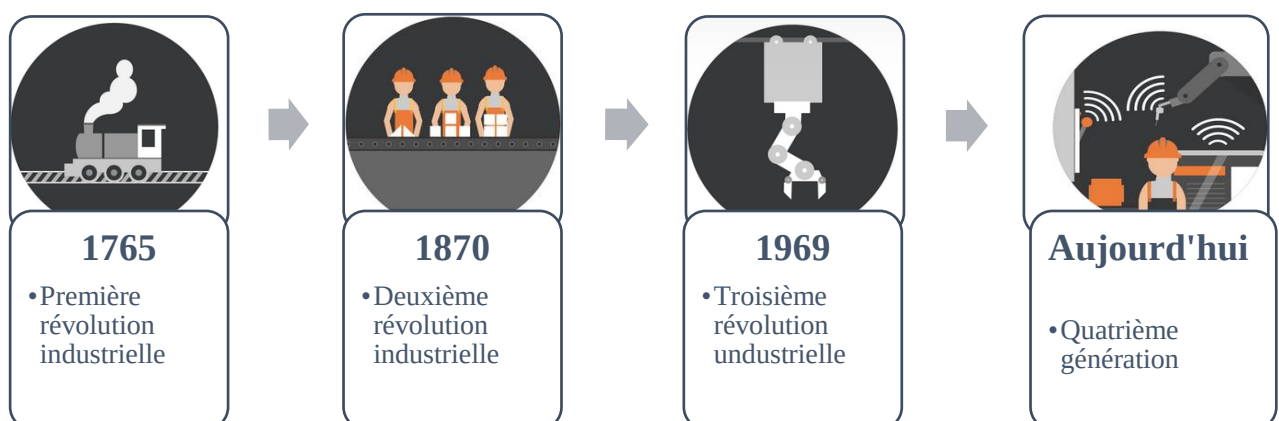


Figure 19: les quatre phases de la révolution industrielle. Adaptée du [44]

Les quatre phases de la révolution industrielle ont marqué l'apparition des politiques de maintenance différentes qui peuvent être résumé globalement comme-suit :

La première phase (1770-1870) apparue avec le l'invention des machines thermiques à vapeur qui ont utilisé le charbon comme une source d'énergie. Durant cette phase, la maintenance consistait à réparer une machine après la cession d'accomplir ses fonctions requises.

Durant la deuxième phase (1870-1969), plusieurs avancées dans les domaines d'ingénierie ont vu le jour, ce qui a permis l'évolution des concepts classiques des opérations de réparations passives entretenus sur les équipements défaillants. Ces avancées sont notamment articulées dans les domaines d'énergie tel que l'électricité et le gaz, mais également dans des grandes unités de production d'automobile tel que Ford. Le domaine de la maintenance a également évolué avec ces avancées pour intégrer d'autres formes de politiques relatives à la maintenance préventive qui vise à intervenir de façon systématique pour maintenir les équipements.

Vers la fin des années 1960, la troisième phase a pris place grâce aux développements relatifs essentiellement à l'électronique avec l'invention des transistors, ce qui a permis le développement des automatismes avec l'invention des Automates Programmables Industriels (API) et la première phase de la Robotique. Des recherches plus profondes ont exploré les politiques maintenance, surtout avec la nécessité des études de sûreté de fonctionnement dans les centrales nucléaires. La maintenance conditionnelle comme une forme de la maintenance préventive a été instaurée dans le but de diminuer la politique de maintenance systématique qui génère de surcoûts importants lorsque les équipements ou les pièces de rechanges sont changés avant la fin de leur durée de vie résiduelle.

Aujourd'hui, nous sommes déjà basculés dans une quatrième phase de cette révolution qui a rapidement exploité les avancées technologiques dans plusieurs secteurs notamment la technologie de l'information numérique. Cette phase se distingue par la disponibilité des méga données produites chaque seconde dans les réseaux développés et qui nécessitent des traitements particuliers pour être exploitables sur plusieurs niveaux que ce soit technique ou managériale comme la prise de décision.

Les avancées durant la présente phase a rendu difficile la tâche de modélisation des stratégies de maintenance vu que les systèmes sont considérés d'ordre complexe, ce qui veut dire que son comportement reste imprévisible dans une optique où l'observabilité des paramètres se trouvent restreintes.

Les chercheurs dans le domaine de la maintenance ont pu relever des défis et ont proposé des solutions basées sur des études approfondies pour la compréhension des phénomènes menant aux défaillances de ces systèmes. Ce présent travail consiste en un état de l'art sur les recherches de modélisation et d'évaluations des stratégies de maintenance des systèmes complexes, ainsi que de recenser, via des outils pratiques, les exigences des managers et pratiquants dans le domaine pour pouvoir proposer une approche générique quant à la modélisation et l'évaluation de ses dites stratégies.

12. Intelligence artificielle et maintenance des systèmes complexes

Dès les années 1950, le mathématicien britannique Alan M. Turing, dans un article « Computing Machinery and Intelligence »[45], inventa la thématique de l'intelligence artificielle (IA), en Anglais AI, en décrivant un jeu d'imitation où il a testé la capacité d'une machine télé-imprimante à simuler la psychologie humaine aussi possible qu'un être humain [46].

John MacCarthy, l'un des fondateurs du concept, décrit l'AI comme : « *toute activité intellectuelle peut être décrite avec suffisamment de précision pour être simulée par une machine* ». Le concept a été exploité dans différentes disciplines comme la robotique, l'informatique, les sciences cognitives et résolution des problèmes complexes. Les chercheurs essayent de modéliser des mécanismes existants dans la nature en traduisant en les traduisant sous formes d'algorithmes qui peuvent être exploitables dans les recherches d'optimisation avancées tel que les fourmis et les abeilles. Tandis que d'autres s'occupent pour les systèmes nerveux et psychisme animal etc.

Les domaines d'ingénierie ont bénéficié des avantages qu'offre l'implication des outils d'intelligence artificielle avec les avancées technologiques. L'apport de l'IA réside dans l'implication de ces outils pour prédire les niveaux de dégradations critiques permettant d'avoir une visibilité meilleure de la durée de vie résiduelle (RUL) des équipements maintenus. L'IA peut apporter une meilleure finesse, dans un environnement de forte dynamique lié aux systèmes industrielles complexes, par la prise en compte des données en temps réels et également classifier le signaux acquises y compris ceux de faibles intensité inexplorés dans les anciens technologies d'instrumentation industrielle [47]. Abdulla Y et col. [48] ont dressé une récente revue de littérature sur l'impact de l'utilisation des techniques de l'IA dans la maintenance des ouvrages de production dans le domaine de l'énergie. Ils confirment que l'IA constitue une solution prometteuse dans l'optimisation des stratégies de maintenance applicables aux cas des systèmes complexes, ainsi dans l'amélioration des stratégies existantes.

Plusieurs compagnies et bureaux d'étude ont exploité les avancées de l'IA dans la conception des nouveaux produits permettant d'anticiper sur les défaillances des équipements par l'interprétation des bruits captés par des détecteurs de vibrations, à titre d'exemple :

- Dans le domaine de l'automobile, l'unité Bosch de MoulinsYzeure [49] a utilisé l'IA pour exploiter via un détecteur de vibrations, dans un système de freinage ESP, les mouvements anormaux pour anticiper sur les pannes d'un véhicule avant qu'il se produisent ;
- L'entreprise one Watt [50] a conçu un dispositif invasif utilisant l'IA et qui permet de diagnostiquer l'état d'un moteur électrique par l'analyse acoustique des signaux transmises durant son fonctionnement sans besoin de démonter aucune pièce ou d'arrêter la production pour pouvoir accéder aux tests statiques.

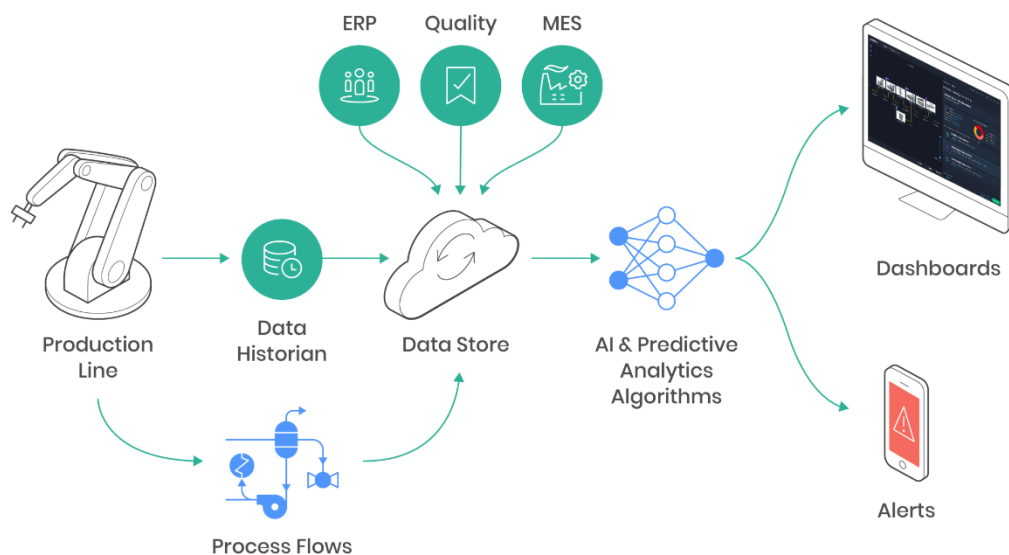


Figure 20: Exemple d'application de l'IA dans une ligne de production

Nous avons mené une revue de littérature qui classifie les techniques de l'IA sous les catégories suivantes [40] :

- **Systèmes basés sur les connaissances**, en Anglais Knowledge based systems (KBS) : où les règles empiriques relatives au domaine d'application sont personnalisées pour optimiser les performances souhaitées ou trouvé un mix adéquat tenant compte des contraintes identifiées.
- **Raisonnement basé sur les cas**, en Anglais Case based reasoning (CBR) : qui consiste à apporter une résolution de nouveaux problèmes en se basant sur le retour d'expérience des anciens problèmes enregistrés. Cette méthode utilise le principe de l'apprentissage automatique, en Anglais

Machine Learning (ML), exploitant des fonctions de similitudes et des techniques de régression linéaires pour prédire le comportement du matériel objet d'étude.

- **Algorithmes génétiques**, en Anglais Genetic Algorithms (GA) : dites également algorithmes évolutionnistes, issus initialement des recherches menées par John Holland h,[51],dès les années 1950 dans l'Université de Michigan. L'objectif derrière l'utilisation des algorithmes génétiques est d'apporter une recherche d'optimisation dans le cas où les données disponibles ne permettent pas d'associer un modèle exacte pour une résolution de problème donnée. Ces algorithmes s'inspirent du principe de la sélection naturelle pour appliquer des solutions potentielles à une population donnée [52]. En 1989, dans son livre « Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning » [53], David Goldberg est devenue la référence de l'utilisation de ces algorithmes dans les études de recherches de laboratoires et d'innovation en industrie.
- **Réseaux de neurones artificiels**, en Anglais Artificial Neural networks (ANNs) : qui s'inspirent du fonctionnement des réseaux neuronaux biologiques, par exemple dans le cerveau humain. Un réseau de neurones est composé généralement de couches en séries reliant les entrées-sorties de ces dernières comme illustrés dans la figure 21 [54]. A chaque synapse (qui relie entre deux neurones) est associé un poids synaptique où les neurones N_{i-1} sont multipliés par ce poids pour ensuite additionnés par les neurones du même niveau i .

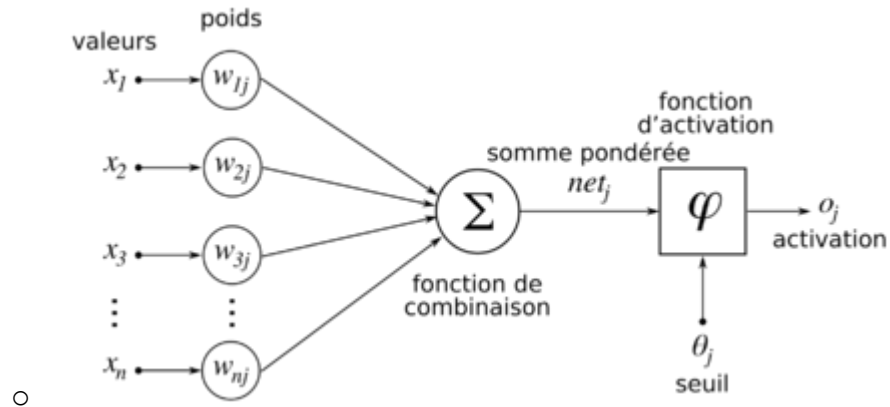


Figure 21 : Structure d'un réseau de neurones artificiel

- **La logique floue**, en Anglais Fuzzy logique (FL) : qui prend en considération des valeurs de vérité partielles pour quantifier l'affectation d'une variable au lieu de l'approche classique combinatoire qui prend soit l'état logique 0 ou 1. Elle permet donc, de présenter des informations de nature incertaine. La figure 22 illustre la différence entre la logique classique et la logique floue qui permet dans ce cas de modéliser l'état tiède d'une solution au contraire de la logique classique qui permet de retenir uniquement soit l'état froid ou chaud.

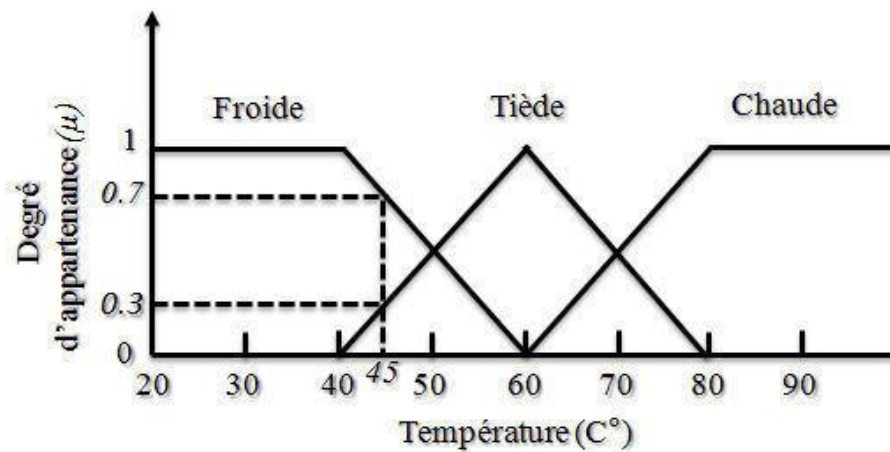


Figure 22: Logique classique et logique floue

13. Problématique & objectifs du sujet de recherche

Après avoir défini le contexte de la maintenance des systèmes industriels et les systèmes complexes ou multi-composants, nous précisons la problématique de recherche dans les points ci-après :

- L'évolution exponentielle des systèmes industriels nécessite un accompagnement adéquat en termes de stratégies de maintenance efficaces ;
- La complexité des interactions entre les composantes des systèmes complexes rend les outils de modélisation analytiques classiques en défaut de justesse par les simplifications exagérées dans la modélisation ;
- L'avancée technologique dans l'instrumentation et les systèmes d'information sont considérés une opportunité pour le développement des modèles innovantes dans la maîtrise des stratégies de maintenance appliquées sur les systèmes complexes ;
- Les sciences de données et les outils de l'intelligence artificielles constituent un atout motivant dans la prédiction de l'efficacité avant son implémentation et amélioration ;
- La réduction du temps de simulation par l'utilisation des solutions Cloud offerte une opportunité majeure pour retenir la simulation comme solution optimale dans les recherches d'optimisation globales.

Les problématiques de recherches ci-dessus constituent une opportunité de notre présent travail de recherche. Notre objectif de recherche est donc de répondre, dans la mesure du possible, aux contraintes industrielles limitant les responsables et décideurs de prendre les décisions adéquates en termes des stratégies de maintenance, en se basant sur des données quantitatives au lieu de ceux qualitatives ou simplement basées sur les jugements d'experts utilisant le retour d'expérience.

Le recours aux jugements d'experts se trouve inapte de prédire les décisions appropriées dans le cas des systèmes complexes vu la difficulté de comprendre les interactions multiples entre ses composantes. Ces interactions sont essentielles pour maîtriser la fiabilité d'accomplir les fonctions requises des systèmes industriels complexes, ce qui explique les phénomènes des « défaillances cachées » qui sont généralement pénalisants dans le cas où l'intervention nécessite une durée considérable pour identifier les causes, mais également d'acquérir les pièces de rechanges correspondantes en cas d'indisponibilité sur stock.

Notre objectif global est de contribuer à l'optimisation de l'efficacité des stratégies de maintenance par la conception d'une approche générique pour la modélisation et d'évaluation des stratégies de maintenances appliquées aux systèmes complexes. Nous visons de retenir le volet management de la maintenance par la simulation des stratégies applicables dans un cadre d'optimisation des indicateurs de maintenance, initialement pour les équipements pénalisants, mais également en proposant une approche générique de diagnostic des perturbations qui constituent des sources des modes de défaillances cachées dans les systèmes complexes.

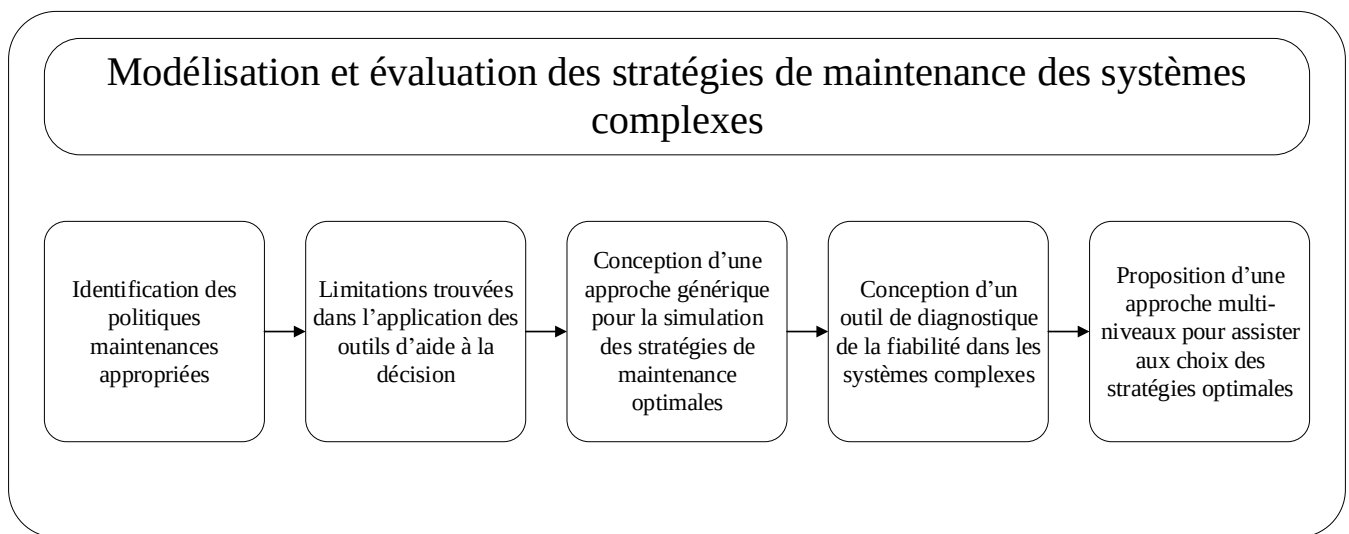


Figure 23: Cadre de nos travaux de recherche

14. Structures de la thèse

La suite du présent rapport est organisée comme suit :

Le deuxième Chapitre reproduit les résultats de recherche sur l'état de l'art. Il résume essentiellement les articles publiés dans le domaine en explicitant les réalisations des chercheurs avec les statistiques correspondantes.

Le Troisième Chapitre présente le résumé de l'application de l'approche pratique pour le diagnostic de la fonction maintenance par un formalisme populaire conçu par les deux boîtes ADEPA & CETIM. Il suit les travaux de recherche du leader dans le domaine M. Yves Lavina.

Ces questionnaires ont été entretenues avec des responsables et techniciens experts dans la maintenance des deux Centrales Thermiques A et B. les résultats montrent des écarts importants dans le mode de gestion ainsi dans le cadre du niveau de maîtrise des opérations de maintenance au sein des deux entreprises. A la fin du chapitre nous regroupons les exigences explicites des responsables pour pouvoir cerner les solutions à prendre en considération dans la construction de notre modèle objet du chapitre suivant.

Dans le quatrième Chapitre, une démarche de conception du modèle d'évaluation et d'optimisation de la maintenance des systèmes complexes a été présentée. Une liste des exigences issues des résultats de recherches sur l'état de l'art a été combinée avec ceux des exigences explicites via les entretiens avec les responsables du cas d'étude. La démarche est développée sur plusieurs niveaux en commentant le passage de chacun. Puis une approche générique pour aborder le niveau technique d'évaluation des stratégies de maintenance est présentée à travers l'approche de modélisation des systèmes multi-énergies, qui est les Bond Graphs. Nous détaillons alors le cas des perturbations des systèmes mécaniques et nous donnons l'exemple d'un système masse-ressort pour l'application de notre approche. A la fin, un bilan est présenté pour synthétiser les travaux faits.

L'avant dernier chapitre présente le cas d'étude retenue pour les systèmes complexes, qui est une centrale thermique de production de l'électricité. Une présentation du principe de fonctionnement du système est donnée, ensuite l'approche proposée est appliquée en explorant les différentes données disponibles dans l'historique.

La dernière partie conclut les travaux de recherche parcourus dans le cadre du présent travail, il résume également les avantages de l'application de notre démarche proposée et également ses limites.

Les futurs travaux de recherche constituent alors l'opportunité de fiabilisation et de développement du modèle proposé pour qu'il prenne en considération les avancées technologiques dans le domaine.

Conclusion

Le présent chapitre résume les différentes facettes de la fonction maintenance et sa relation avec les systèmes complexes. Les définitions relatives aux stratégies de maintenance varient avec les phases des révolutions industrielles. Les systèmes complexes par définition sont ceux difficiles de prévenir les comportements par des équations mathématiques. Il est donc primordial de prendre en considération les phénomènes des défaillances cachées dont l'observation du système étudiée se trouve incapable d'alerter de manière proactive les dégradations engendrées au sein du système complexe. Les approches mathématiques classiques se trouvent limitées dans le sens où l'optimisation de la maintenance est conditionnée par la maîtrise de la fiabilité du système pour garantir les performances optimales tout en respectant les consignes préconisées.

Nous allons détailler dans le prochain chapitre l'état de l'art dans le domaine pour en délimiter les avantages et inconvénients des approches développées pour la modélisation en vue de l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes complexes.

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART SUR LA MODELISATION ET L'EVALUATION DES STRATEGIES DE MAINTENANCE DES SYSTEMES COMPLEXES

Introduction

Les actions de maintenance visent à garantir la disponibilité des équipements de production tout en diminuant les défaillances (pannes) qui engendrent des surcoûts en termes d'indisponibilité et d'intervention pour réparation urgente. La maintenance possède également une dimension de sûreté de fonctionnement (SDF) par l'amélioration de la sécurité des biens et des personnes.

Ces actions de maintenance sont regroupées sous forme de politiques qui dépendent des orientations stratégiques de l'entreprise pour garantir les indicateurs de performances souhaités tel que la disponibilité, la productivité et la qualité de ses produits. Les opérations de maintenance sont regroupées en cinq principaux niveaux commençants, selon la norme AFNOR X60-100, de l'inspection visuelle jusqu'à l'opération de modification ou de reengineering, ils indiquent également le degré de complexité des actions entretenues comme le montre le tableau 3 :

Tableau 3: les cinq niveaux de maintenance

Niveau de maintenance	Exemples des actions entreprises
Niveau 1	Actions d'inspection visuelle ou de réglages simples ne nécessitant pas de démontage de l'équipement.
Niveau 2	Actions de rechanges des pièces de rechanges simples ou d'intervention mineures de maintenance préventives.
Niveau 3	Actions relatives aux inspections et de diagnostics des défaillances (pannes)
Niveau 4	Actions majeures de maintenance (préventive & corrective) sauf rénovation et modification des installations.
Niveau 5	Actions de rénovation et de modification importante.

Pour comprendre le coût réel de la maintenance. Une étude menée par la société Life Cycle Engineering Company (LCE) [1] a révélé que le prix d'achat des équipements tournants était compris entre environ 10 et 25% du coût total de possession, alors que les coûts de maintenance, d'énergie et l'opération représentait 75 à 90%.

Selon une étude menée par Leponomen Institue, spécialisé dans la protection des données et les nouvelles technologies de l'information, le manque à gagner suite à une panne non-programmée s'élève à 5 617 dollars en 2010 pour enrichir 8 851 dollars en 2015 [47], comme mentionné dans la figure 24.

Cette évolution montre l'impact relié aux travaux de maintenance programmés et les stratégies adéquates pour éviter tout arrêt fortuit dans un environnement de plus en plus complexe.

L'optimisation des stratégies de maintenance permet d'anticiper les défaillances qui causent parfois des indisponibilités de longue durée quand il s'agit d'un matériel spécifique non disponible en stock pour l'exploitant ou le fournisseur lui-même. Selon une étude menée par le cabinet Roland Berger [55], dans le secteur de production de l'énergie, une amélioration significative avec une réduction de l'ordre 75 % dans les pannes des équipements, après avoir mis en place des programmes de maintenance prédictives dans ses stratégies de maintenance.

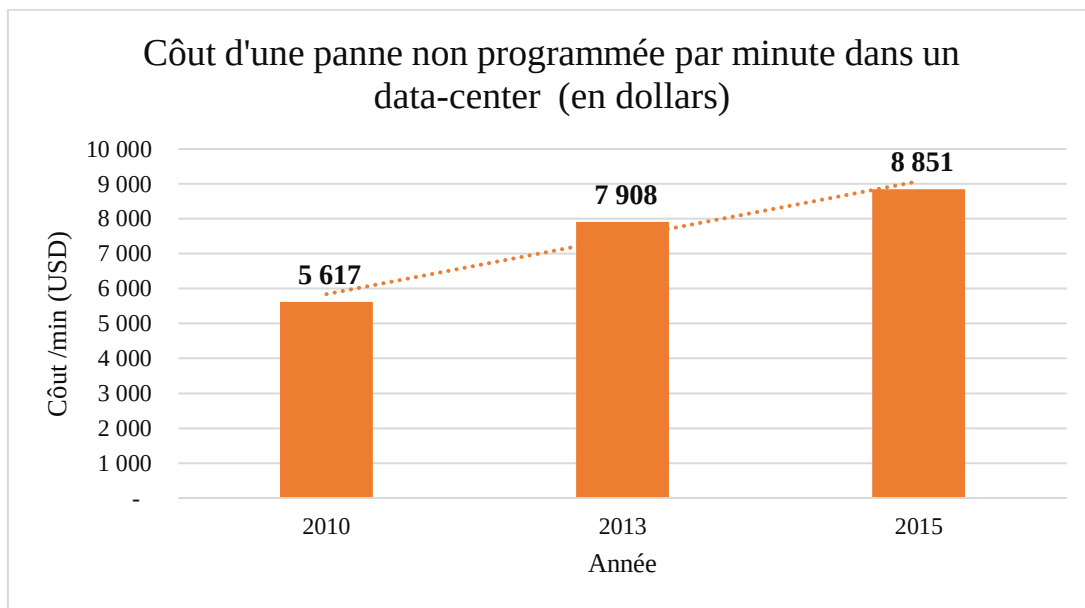


Figure 24: Coût d'une panne non programmée par minute dans un data-center en dollars

Cela conduit à davantage d'efforts vers une optimisation efficace des techniques utilisées dans la modélisation et la simulation des stratégies de maintenance. La communauté des chercheurs avait beaucoup attiré l'attention il y a des décennies. Tillman [56] a illustré les techniques opérationnelles permettant d'optimiser la fiabilité et la disponibilité (R & A) des systèmes. Divers modèles analytiques et mathématiques ont été publiés dans la littérature. Mais la complexité rencontrée dans les systèmes industriels réels limite leur applicabilité, en particulier lorsqu'il s'agit de systèmes complexes. Dekker [57] a rapporté une évaluation critique des modèles d'optimisation fournissant des informations moins utiles et faisant des hypothèses très simplifiées avec les systèmes de cas réels [58]. Ensuite, Andijani et Duffuaa ont observé dans [59] la faiblesse constatée dans les études de simulation en systèmes de maintenance, en particulier les validations de modèle et l'expérience de conception de l'étude de simulation.

Plusieurs types de recherche ont fourni des modèles pour optimiser les stratégies de maintenance [60][60]–[63]. Les différents modèles sont généralement conçus pour un système spécifique ou limitent certains aspects pertinents des systèmes de maintenance tels que la dynamique et la complexité. Les progrès de l'ingénierie électronique ont permis aux nouvelles générations d'ordinateurs d'être plus rapides et moins onéreux, offrant ainsi la possibilité d'implémenter des problèmes d'optimisation à objectifs multiples (MOOP) dans un environnement d'optimisation basé sur la simulation. Les auteurs de [64] ont montré divers avantages du logiciel de simulation, en particulier ceux de la simulation à événement discret (DES). Law et McComas ont souligné la rentabilité obtenue à partir des progiciels d'optimisation basés sur la simulation (SBO).

Dans ce travail et dans les références connexes [65], [66] , il est clair que peu de documents ont traité la combinaison de la simulation et de l'optimisation dans les systèmes de maintenance. Dans un article récent d'Alrabghi et Tiwari [67], il est présenté une nouvelle approche est présentée permettant de combler les lacunes relevées dans les modèles fondés sur des hypothèses trop simplistes. Il fournit un cadre permettant d'optimiser les stratégies de maintenance des équipements non identiques en tenant compte à la fois de l'aspect dynamique et de la gestion des pièces de rechange des systèmes de maintenance complexes.

1. Méthodologie de recherche bibliographique

Une stratégie de recherche multicritères a été lancée, à partir de 2000, en utilisant divers moteurs de recherche scientifiques indexés tels que la base de données SCOPUS, Google Scholar, EBSCO (Electronic Business Source Complete) ainsi que des séries de manuels publiés sur le terrain. De nombreux résultats ont été obtenus, et les plus pertinents ont été sélectionnés via l'application des filtres multicritères, limités aux mots-clés suivants : optimisation, maintenance, simulation, système complexe et stratégies de maintenance. Un total de 114 documents ont été sélectionnés, puis un filtrage méthodique a été effectué pour conserver 34 articles [36], [60], [73]–[82], [62], [83]–[92], [63], [93]–[97], [67]–[72] liés au travail déjà traité avec les mots-clés mentionnés.

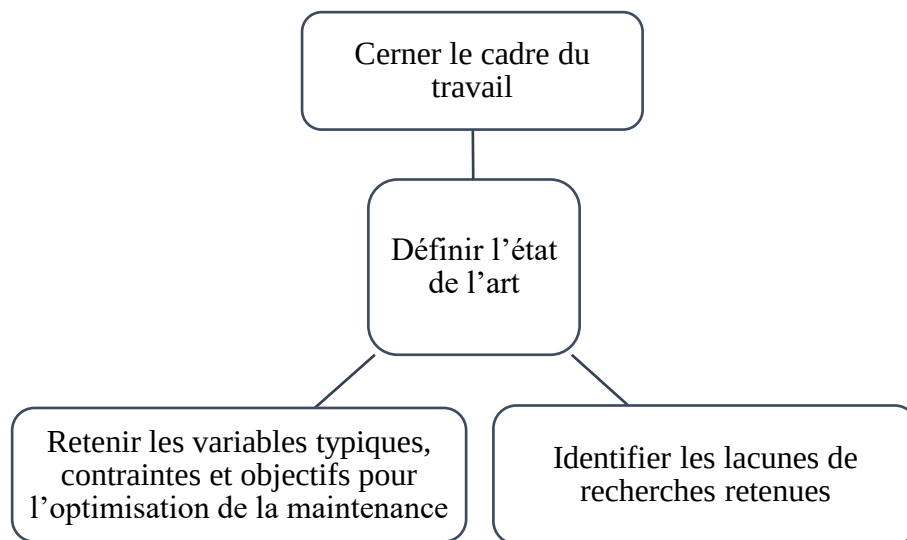
Phase 1 : Ébauche sur le sujet de recherche

Cette première phase vise de cerner la thématique de la question de recherche en identifiant les mots clés pour pouvoir consulter les documents disponibles dans la littérature.



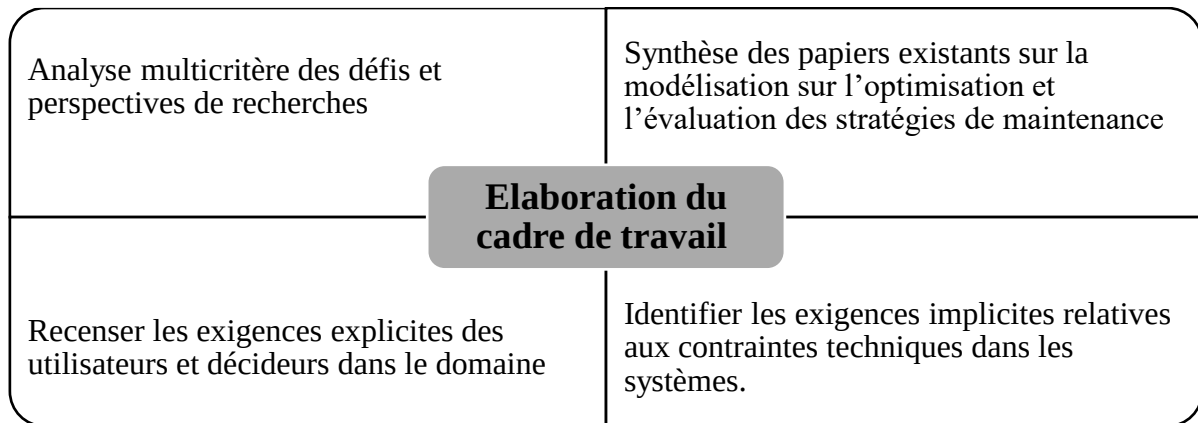
Phase 2 : Définir l'état de l'art

La deuxième phase a pour objectif de définir l'état de l'art en classifiant les contraintes et objectifs liés au sujet de recherche tout en signalant les lacunes de recherches dans le domaine.



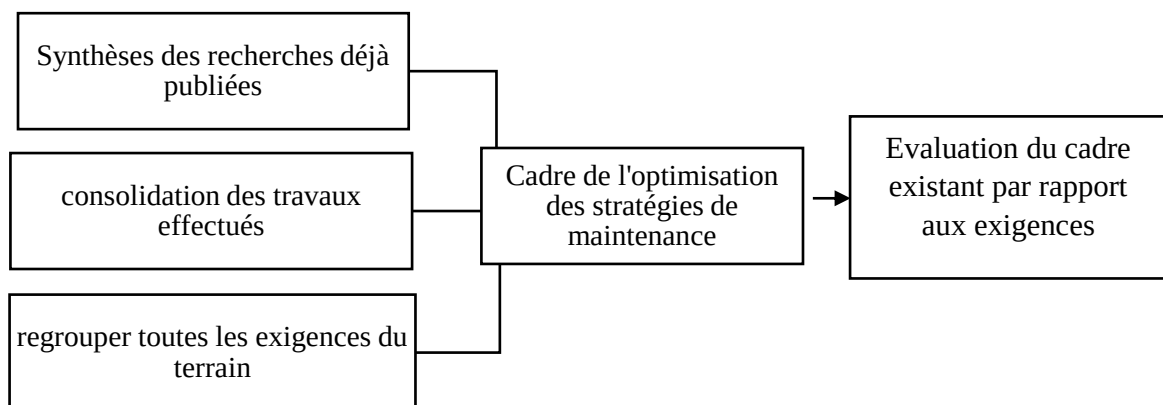
Phase 3 : Élaboration du cadre de travail

Dans cette troisième phase dédiée à l'élaboration du cadre de travail, nous avons mené une analyse multicritère des perspectives de recherches à travers l'exploration des papiers retenus dans l'état de l'art. Ceci devra nous permettre d'explicitier les exigences dans le processus de construction de la démarche appropriée pour la modélisation et l'évaluation des stratégies de maintenance.



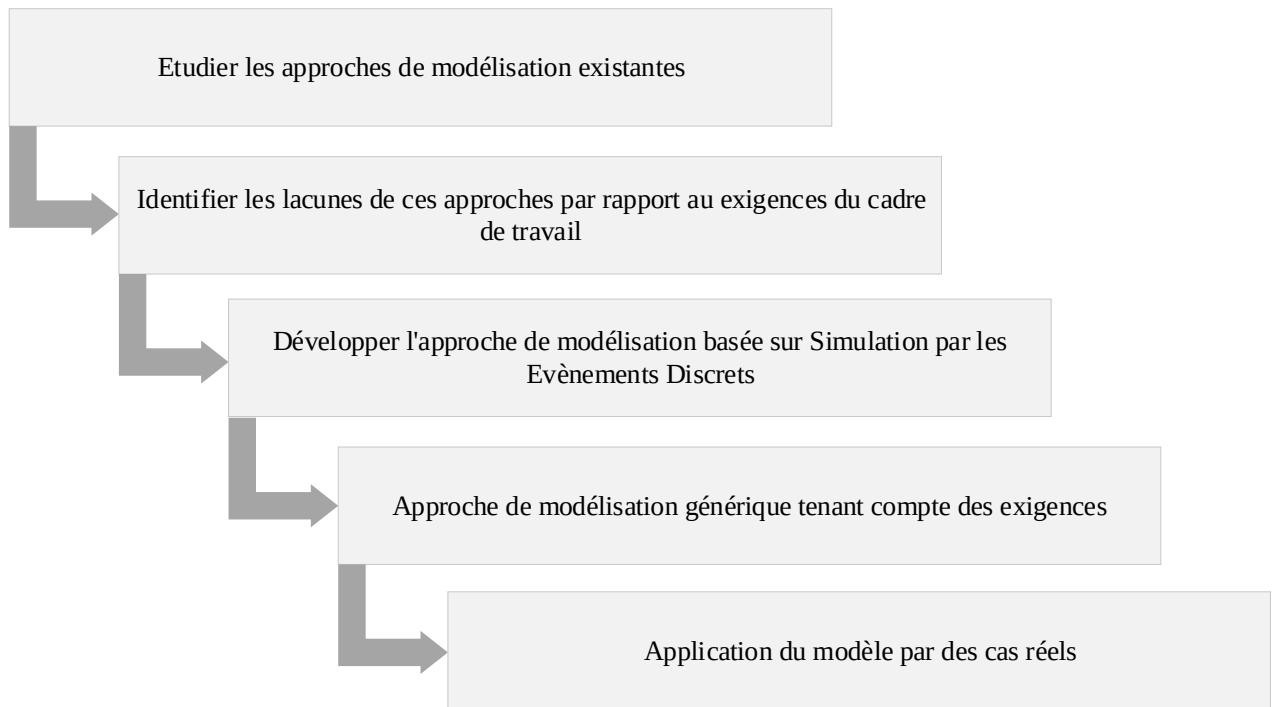
Phase 4 : Développement de la méthodologie de travail pour la modélisation et l'évaluation des stratégies de maintenance par la simulation

Une fois le cadre de travail élaboré, nous avons pu rassembler, dans cette partie, les résultats de la recherche bibliographique avec les exigences déduites du terrain à travers les questionnaires collectés pour évaluer le cadre existant par rapport aux exigences tirées.



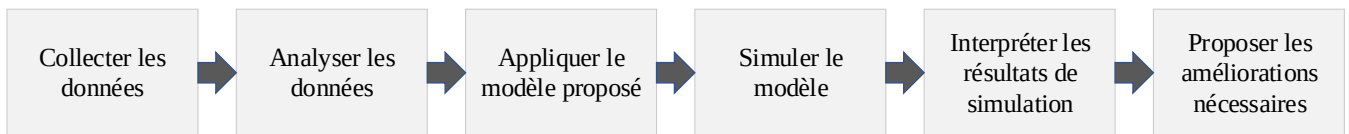
Phase 5 : Proposition de l'approche de modélisation

Nous avons ensuite proposé dans cette étape une approche de modélisation pour l'évaluation des stratégies de maintenance basée sur les résultats des travaux et recensement des utilisateurs dans le domaine de la maintenance des systèmes complexes.



Phase 6 : Expérimentation par des cas industriels

Le modèle retenu est soumis à une étude de cas d'un système complexe pour pouvoir tirer ses points forts et ceux à améliorer dans le cadre des futurs travaux de recherche.



2. Synthèse de la recherche bibliographique

Au début, des modèles analytiques [98] ont été proposés pour modéliser les interactions entre les équipements industriels et les stratégies de maintenance recommandées par les constructeurs au stade de la fabrication. Aujourd'hui, ces modèles analytiques sont considérés incapables de refléter la réalité de systèmes industriels de plus en plus complexes en ordre [40].

Les auteurs dans [99] ont dressé une revue de la littérature de modèles de maintenance optimaux de systèmes soumis à une défaillance. Les auteurs dans [100] ont étudié les fonctions logistiques multiples de maintenance basée sur les conditions avec des systèmes complexes. Dekker et col ont souligné les modèles d'optimisation de la maintenance et leur application dans un article de synthèse[100]. Les auteurs dans [101] ont expliqué les avantages utiles de la simulation dans l'optimisation des politiques de maintenance. Certains modèles de régression utilisant la simulation sur ordinateur et la conception expérimentale dans un contexte de production sont développés dans [87].

Les approvisionnements en pièces de rechange intégrés aux modèles d'optimisation de la maintenance ont été analysés par Sarker et Haque [96]. Ils ont souligné qu'il est important d'envisager une procédure d'optimisation conjointe pour les politiques et les stocks disponibles en comparant les résultats obtenus avec des méthodes séparées / séquentielles.

Le système de maintenance dans un contexte de production a été étudié dans [87]. La nécessité d'un modèle de simulation pour mieux comprendre l'environnement dynamique de maintenance et les contraintes rencontrées dans l'industrie est démontrée.

Les recherches portant sur l'optimisation de la maintenance avec différentes techniques de simulation sont citées dans de nombreux domaines, tels que la production [87], [102] la logistique [103], l'approvisionnement en pièces de rechange [91], [96], les équipements de santé [104], et domaine militaire [72] en plus de l'astronomie, aéronautique et d'autres.

3. Statistiques des recherches retenues

Les articles inclus dans la littérature montrent l'apport potentiel de la communauté des chercheurs dans le domaine de l'optimisation de la maintenance. Les figures 25 et 26 résument les statistiques des résultats de la bibliographie :

3.1. Nombre de publications

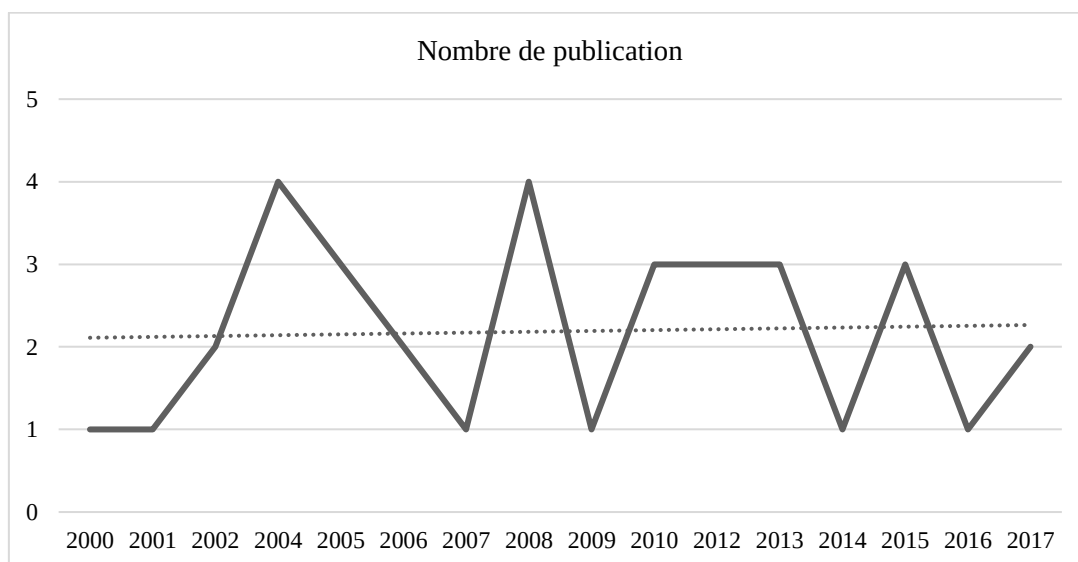


Figure 25: Distribution des publications par année

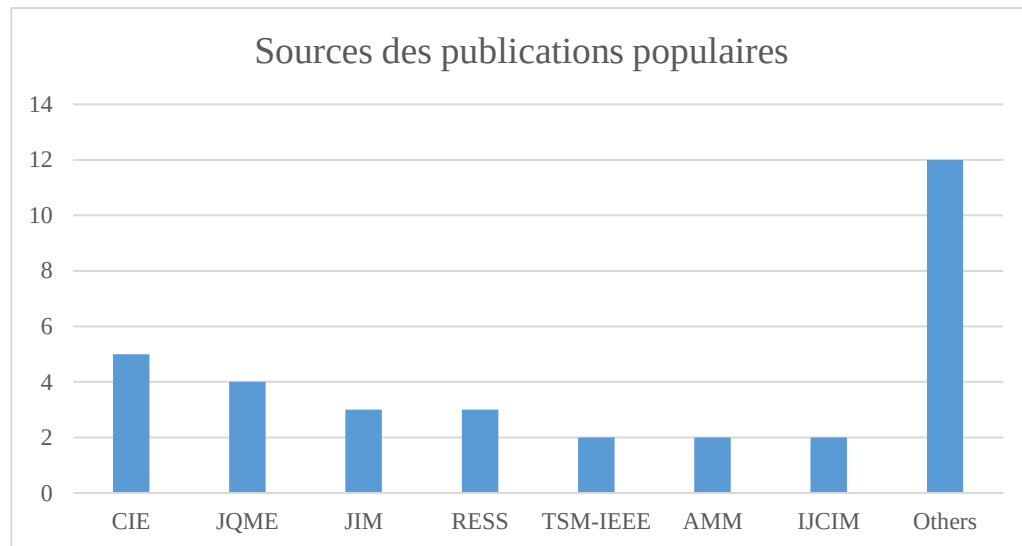


Figure 26: Sources de publications

Avec les acronymes suivants :

Tableau 4: Liste des journaux

Acronyme	Signification
CIE	Computers and Industrial Engineering
JQME	Journal of Quality in Maintenance Engineering
JIM	Journal of Intelligent Manufacturing
RESS	Reliability Engineering and System Safety
TSM-IEEE	IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing
AMM	Applied Mathematical Modelling
IJCIM	International Journal of Computer Integrated Manufacturing

3.2.Statistiques sur l'état de l'art des stratégies de maintenance

La littérature sur les stratégies de maintenance, présentée à la figure 27 illustre diverses approches utilisées pour optimiser les objectifs de maintenance. Elle indique clairement la vaste utilisation de la maintenance préventive (59%) dans la majorité des documents examinés. La politique en matière de particules inclut l'utilisation de MP périodiques telles que [60], [79], [90], [105] ou MP [73]

La stratégie basée sur la maintenance conditionnelle (CBM) figurait dans 24% ([69], [71], [73], [97], [103]) des articles avec un taux de publication croissant au cours des dernières années. L'utilisation de l'internet des objets et des outils de surveillance modernes sont utilisés à partir de la 4ème génération industrielle [103]. Le système de maintenance intelligent (IMS) est utilisé dans un modèle décisionnel pour définir la combinaison optimale de différentes politiques dans les centrales électriques [95], [106].

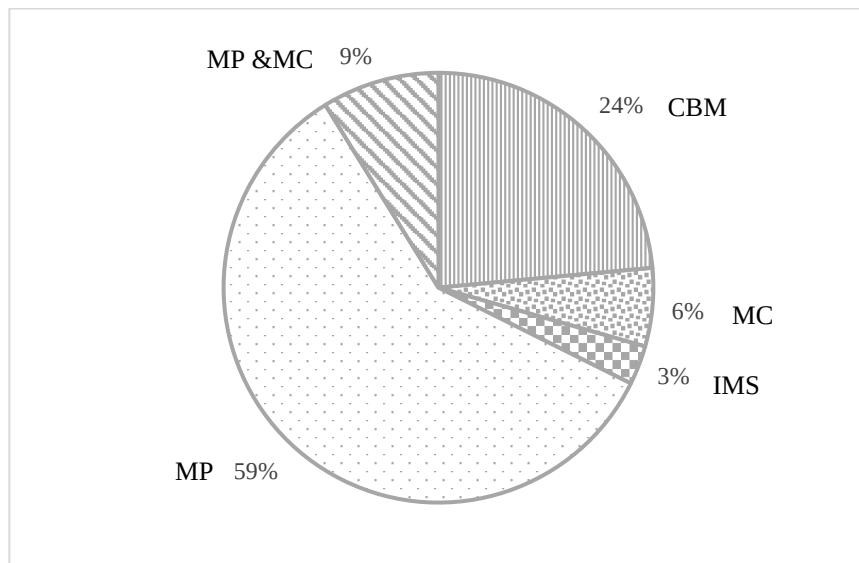


Figure 27: Répartition des stratégies de maintenance dans la littérature

4. Modélisation des stratégies de maintenance

La modélisation des systèmes de maintenance a été étudiée dans la littérature il y a plusieurs décennies. La recherche a fourni plusieurs modèles pour refléter la majeure partie de la complexité des systèmes de la vie réelle. Une revue de la littérature a été réalisée pour retenir le principal intérêt majeur des chercheurs classés dans la figure 28.

Comme illustré, les défis de la modélisation de la maintenance couvrent un large éventail de sections. Les outils développés aident les gestionnaires à prendre les bonnes décisions

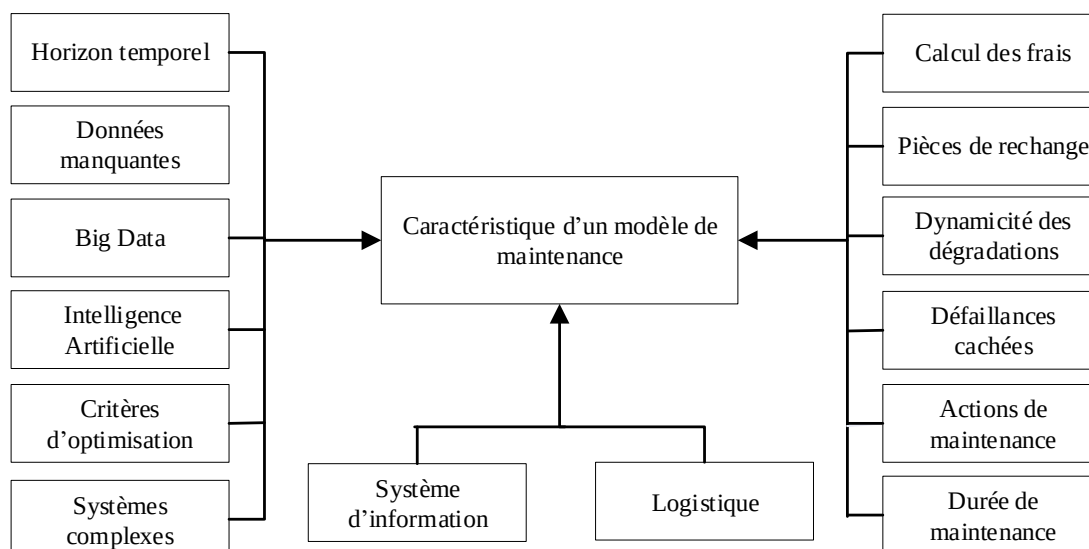


Figure 28: Caractéristique d'un modèle de maintenance. Adaptée du [133]

La gestion des contraintes dans des cas réels pour la maintenance des modèles a reçu une attention particulière de la part des chercheurs et des praticiens. Une revue systématique de la littérature est réalisée pour résumer l'état actuel et les défis à surmonter dans le domaine. La figure 29 détaille les caractéristiques et les limites des modèles de maintenance.

Les auteurs dans [73], [77], [106] ont présenté l'aspect dynamique des systèmes. L'opportunité et la structure variable sont détaillées. La pièce de rechange est dans un modèle d'optimisation commun [71], [91], [96][23]. D. Sillivant [103] a étudié les aspects logistiques de la modélisation de la maintenance en tant que source importante de temps d'arrêt perdu. Les auteurs ont proposé une approche proactive pour commander des fournitures de pièces de rechange uniquement lorsqu'une action de maintenance est programmée. Ils ont démontré les avantages de l'application d'une telle stratégie. Les auteurs de [107] ont dressé une revue de littérature récente sur la politique de maintenance utilisée pour les modèles d'optimisation. Les modèles d'optimisation existants reposent toujours sur diverses hypothèses trop simplistes des systèmes réels industriels. Une maintenance parfaite et imparfaite dans un environnement de données manquant est citée dans [108]. La méthode de saisie des informations et leur qualité peuvent conduire à une estimation inappropriée de la portée des modèles d'optimisation. Peu de recherches ont pris en compte l'incertitude des données d'événements non enregistrées, ainsi qu'une défaillance cachée se produisant pendant que la surveillance ne rapporte qu'une partie des paramètres observés.

Les dépendances et les interactions entre les équipements d'une ligne de processus sont peu détaillées dans la modélisation, tandis que la modélisation des coûts en tant que fonction objective fait l'objet d'une étude approfondie. Les auteurs dans [67] ont proposé une nouvelle approche pour modéliser des systèmes de maintenance complexes pour des systèmes multi-unités non identiques à l'aide de la technique DES. Les modèles de maintenance basés sur les conditions font l'objet de nombreuses discussions [36], [73], [80], [100], [108]. Les études de recherche ont démontré l'intérêt de monter des modèles concrets de CBM pour l'optimisation [109] et les références qui y figurent.

Certains modèles prennent le facteur d'erreur humaine dans un modèle d'optimisation. Les auteurs dans [36] ont proposé un modèle de fiabilité humaine avec CBM pouvant donner une certaine approche réaliste au modèle déjà développé.

Récemment, la maintenance intelligente [106] et l'intelligence artificielle [95] ont été intégrées à la modélisation afin de minimiser les conditions de simplification excessive des systèmes complexes réels, car la machine est considérée comme intelligente avec le concept de l'industrie 4.0.



Figure 29: Paramètres d'un système de maintenance

5. Techniques d'optimisation des choix de stratégies de maintenance

Des efforts considérables ont été déployés dans l'ingénierie des techniques d'optimisation. Les chercheurs développent de nombreuses méthodes et modèles pour optimiser et fournir des résultats de politiques efficaces en appliquant la technique d'optimisation appropriée.

L. Pintelon et col. [110] ont présenté les principaux problèmes d'optimisation liés à l'optimisation continue / discrète ou mixte, à des critères statiques ou dynamiques, au calcul déterministe ou probabiliste, à l'optimisation contrainte ou non contrainte et à l'optimisation singulière ou à objectifs multiples. Ces contraintes ne conviennent pas dans certaines situations en raison des diverses dépendances entre l'équipement et la complexité rencontrées dans les études de cas réels. C'est pourquoi certains documents ne mentionnent pas la limitation.

D'après [107], la figure 30 résume les modèles d'optimisation en trois catégories principales: les modèles de certitude, basés sur le risque et d'incertitude.

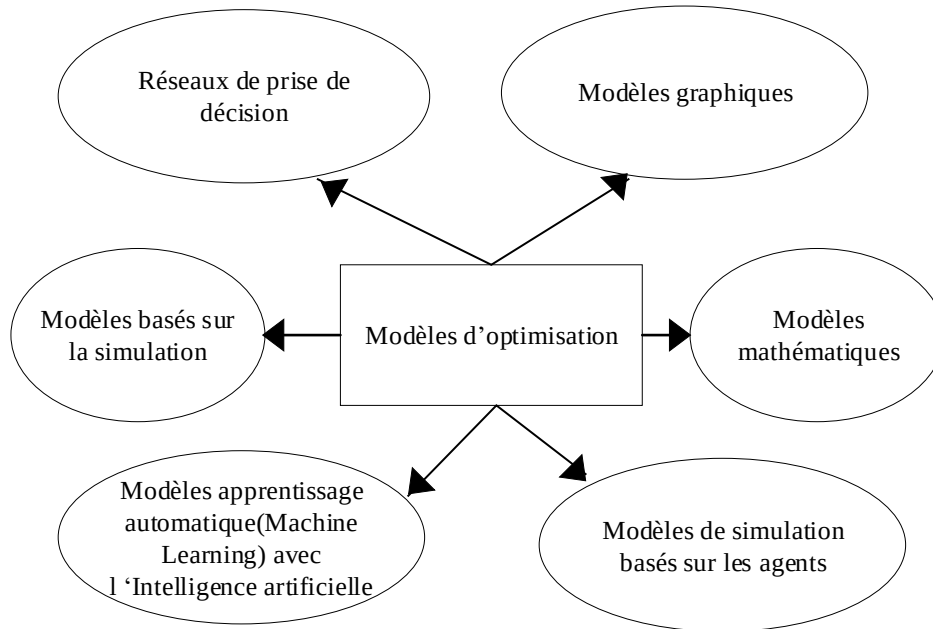


Figure 30: Modèles d'optimisation

La classification principale proposée par Ding et col. [107] est basée sur une hypothèse de théorie de certitude comme suit :

La première catégorie est la certitude. Le plus désiré grâce au niveau d'information que peuvent fournir et mener à un système de connaissance parfaite. De nombreux auteurs ont utilisé la grille de prise de décision (DMG) en tant que modèle graphique aidant les gestionnaires et les experts à choisir la politique de maintenance optimale en fonction de critères tels que la fréquence des défaillances, les défaillances de coûts et autres combinaisons [111]–[113].

Les modèles de catégories de risque regroupent les approches mathématiques, de simulation et d'intelligence artificielle (IA). Selon Ding et col. [107] cette catégorie utilise la distribution de probabilité à partir d'un état actuel pour prévoir l'évolution future possible et choisir la politique de maintenance optimale.

La troisième partie est la catégorie d'incertitude, l'évolution future et les lois de probabilité ne sont pas bien connues. Par conséquent, le modèle d'optimisation approprié n'est pas complet en ce qui

concerne le niveau de succès des informations. Cela conduit souvent à faire des hypothèses trop simplistes pour conserver le résultat optimal.

6. Algorithmes d'optimisation des stratégies de maintenance

Les algorithmes d'optimisation cités dans la littérature illustrent la grande diversité de discussions sur les mêmes objectifs d'optimisation avec différentes méthodes et donnent des résultats satisfaisants [58], [66], [67].

Des méthodes d'optimisation pertinentes inspirées par la nature ont été citées par le Pr. Patnaik [114]. Optimisation inspirée par les comportements des animaux, notamment :

- Algorithme d'école de poisson
- Algorithme de saut de grenouille
- Optimisation des colonies de fourmis (ACO)
- Optimisation des colonies d'abeilles artificielles
- Optimisation des essaims de particules
- Algorithme d'optimisation des essaims de chats
- Algorithme inspiré des chauves-souris
- Algorithme d'intelligence des bactéries.

Le nombre actuel de méthodes d'optimisation est d'environ 140 méthodes d'algorithmes d'optimisation différentes citées dans la littérature [114]–[117]. Pour la plupart des articles examinés, l'utilisation de différents algorithmes d'optimisation est réalisée dans le principal algorithme génétique (GA) ; Annelage simulé (SA) et leur combinaison (SAGA) : sont les techniques d'algorithmes les plus rapportés.

Le résultat mentionné est le meilleur résultat de l'application de l'approche SAGA. Ces méthodes sont classées comme algorithmes d'optimisation non traditionnels.

7. Objectifs d'optimisation pour les systèmes de maintenance

L'utilisation de l'optimisation multi-objectifs (MOO) est beaucoup moins fréquentée que l'optimisation mono-objectif (figure 31). Ceci est justifié en simplifiant la complexité du calcul du temps. Tandis que la dernière recherche portait davantage sur le MOO. Certains chercheurs utilisent une approche multi-objectifs en considérant une fonction objective [72], [84].

La réduction des coûts est l'objectif le plus souvent mentionné dans 71% des articles examinés (figure 32). Le coût plus élevé de la maintenance [1] peut s'expliquer par des pannes répétitives et inattendues, des pannes d'équipement stratégique ou des actions de maintenance non organisées.

La maximisation de disponibilité est rapportée dans 26% des papiers (figure 32). Les auteurs dans [94] considèrent cet objectif comme un coût de production plus élevé que celui de la maintenance. D'autres recherches combinent le critère de disponibilité maximale avec le critère de coût [62], [74], [97].

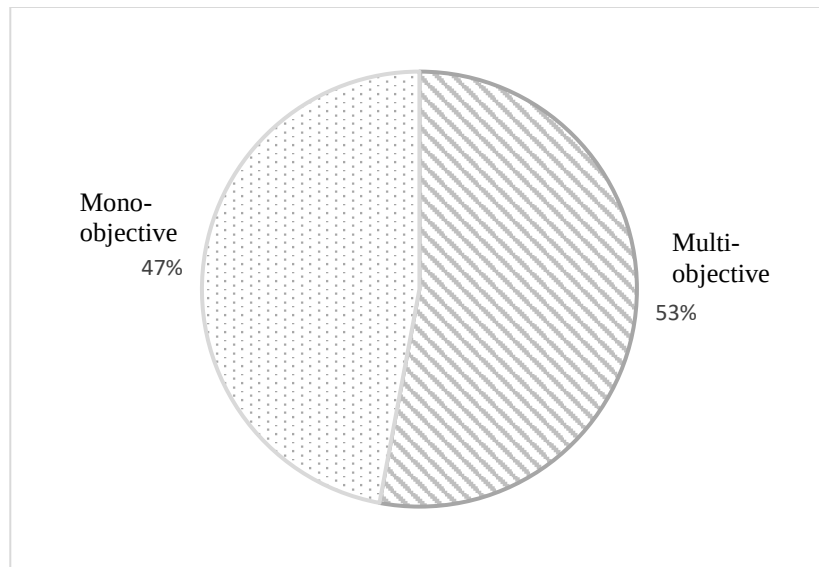


Figure 31: Optimisation mono et multi-objectives

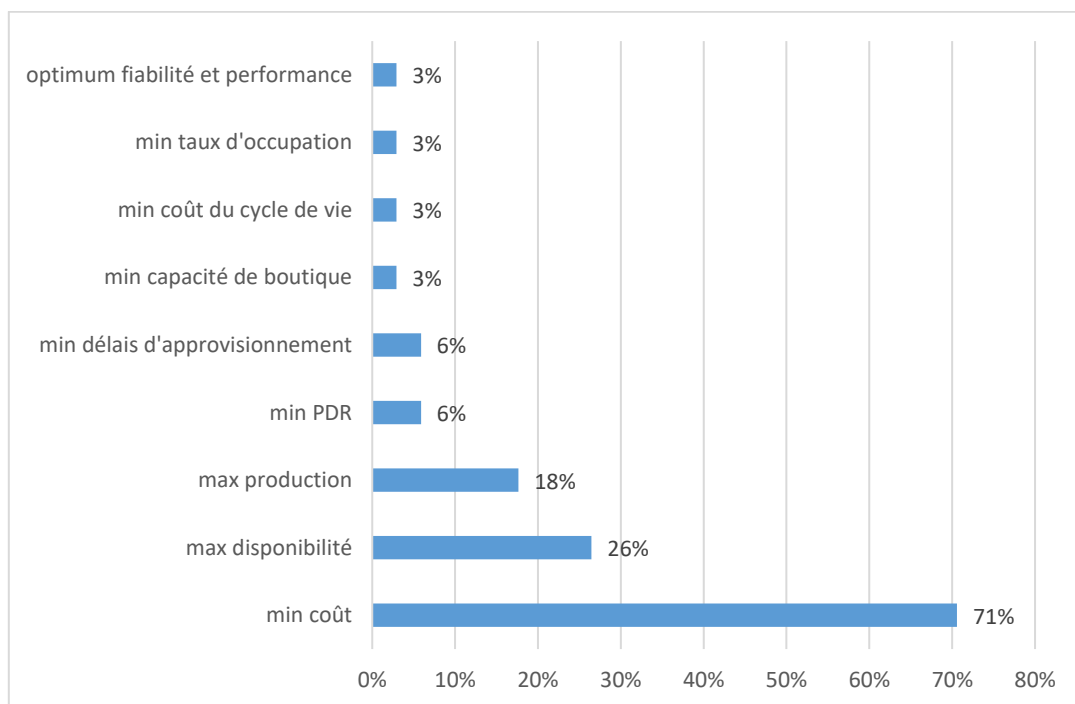


Figure 32: répartition des objectifs d'optimisation

8. Autres paramètres d'optimisation de la maintenance

Les paramètres d'optimisation indiquent une utilisation plus importante du critère d'optimisation à horizon fini (figure 33), tandis que la contrainte logistique est moins prise en compte avec seulement 9% (figure 34). Traiter également la gestion des pièces de rechange pour optimiser la maintenance apparaît dans 21% des cas (figure 35). Les articles les plus cités sont basés sur des cas académiques connus, alors que les systèmes réels ne sont mentionnés que dans 29% des articles (figure 36).

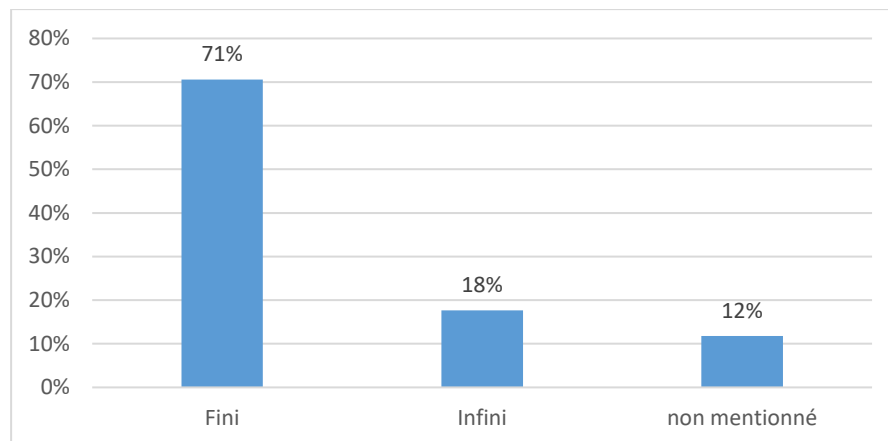


Figure 33: horizon de simulation

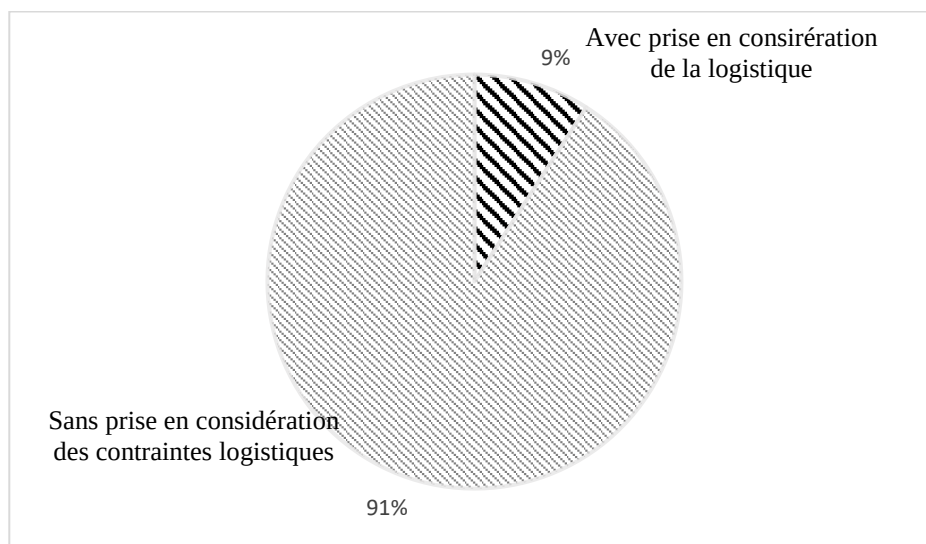


Figure 34: logistique & optimisation

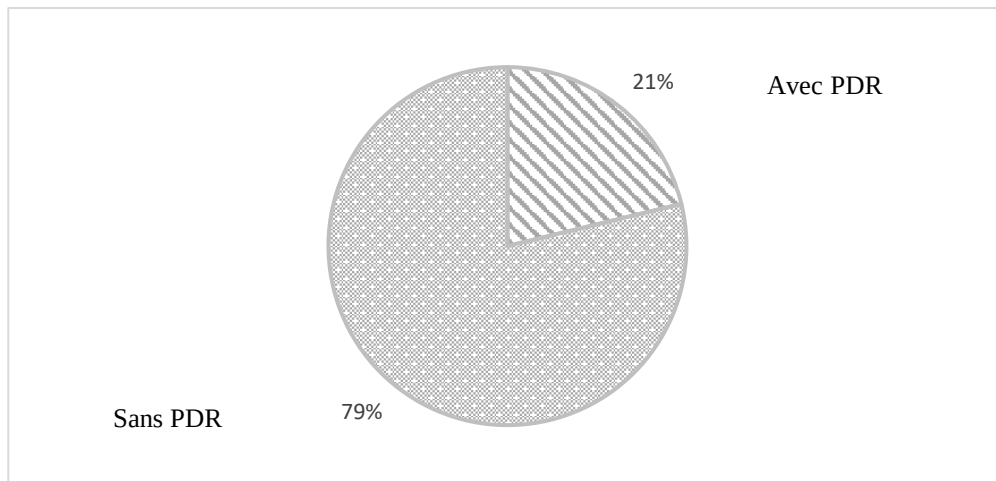


Figure 35: Optimisation et gestion des pièces de rechanges

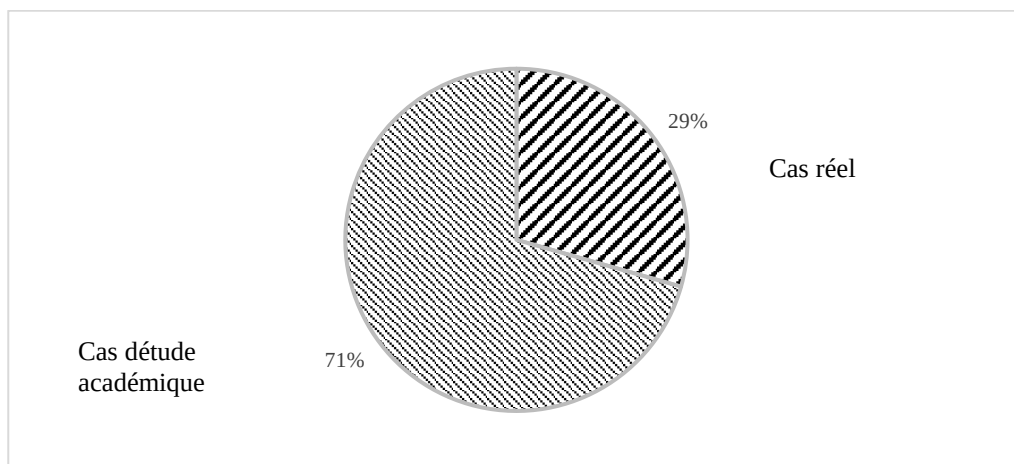


Figure 36: Cas d'étude dans la littérature

9. Techniques de simulation pour l'optimisation de la maintenance

Comme le montre la figure 37, la plupart des articles examinés utilisent la simulation d'approche DES et parfois associée à d'autres techniques. Le DES offre plusieurs avantages, notamment lorsque les modèles analytiques sont limités. Il offre une meilleure compréhension du système modélisé, des transitions visuelles, une modélisation rapide, ainsi qu'une flexibilité des paramètres de simulation moins coûteuse.

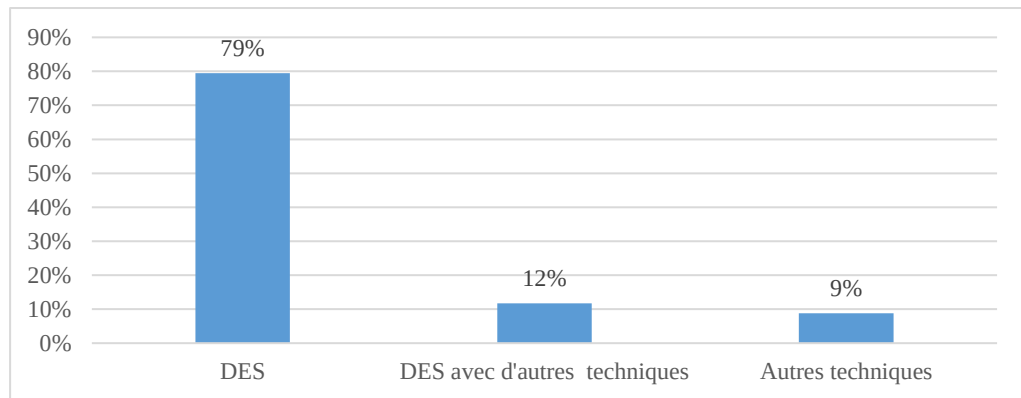


Figure 37: Techniques de simulation pour l'optimisation

Comme illustré dans la figure 38, le logiciel Arena est le plus répondu par les chercheurs avec un pourcentage de 17 %. Il est à noter que 32 % des papiers ne montrent pas le logiciel de simulation utilisé. L'annexe 2 mentionne les différents logiciels de simulation avec leurs capacités en matière de modélisation et d'outils d'optimisation à travers la simulation.

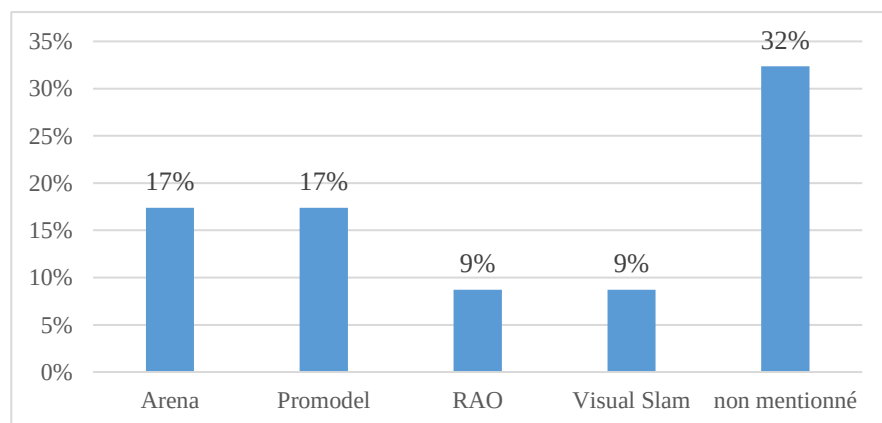


Figure 38: logiciels de simulation pour l'optimisation

Conclusion

La présente revue systématique de la littérature est une tentative de résumer les recherches effectuées sur la modélisation et évaluation des stratégies de maintenance de systèmes complexes.

Une contribution significative à l'optimisation a été remarquée, principalement basée sur des approches de simulation qui fournissent plus de flexibilité pour faire face à la simplification hypothèses requises par les approches analytiques. Une contribution considérable a proposé des modèles pour optimiser la meilleure combinaison de politiques de maintenance. Ces modèles concernent principalement la maintenance préventive, la maintenance conditionnelle et les systèmes de maintenance intelligents.

CHAPITRE III : RECENCEMENT DES ENJEUX DE LA MAINTENANCE DES SYSTEMES COMPLEXES A TRAVERS LE DIAGNOSTIC DE LA FONCTION MAINTENANCE

Introduction

Compte tenu de l'écart constaté dans les résultats de la recherche bibliographique concernant le manque des études réelles émanant du terrain pour l'évaluation des stratégies de maintenance pour les systèmes complexes. C'est dans cet objectif que le présent chapitre vise de répondre en présentant un questionnaire pour le cas retenu des centrales thermiques pour la production de l'électricité. Un tel système est considéré comme un des systèmes complexes selon les définitions que nous avons retenues dans le cadre des travaux de la présente thèse.

Cette partie comprendra les résultats obtenus lors des séries d'entretien menés avec les décideurs dans le domaine de production d'électricité au Maroc.

Nous avons utilisé l'approche populaire déduite des travaux d'Yves Lavina pour le diagnostic de la fonction maintenance. Le formalisme adopté est développé par deux organismes de renommée dans le domaine qui sont respectivement L'Agence Nationale pour le Développement de la production automatisée (*ADEPA*) et le Centre d'Étude Technique des Industries Mécanique (*CETIM*).

Nous allons cerner les besoins exprimés sur terrain pour pouvoir présenter dans un regroupement couvrant les principaux piliers de la fonction maintenance, que ce soit sur le niveau technique ou managérial.

1. Méthodologie de travail

Le formalisme contient un total de 93 questions de type fermé. Les questions sont réparties sous 8 sections qui forment les facteurs principaux qui influencent de façon détaillé la fonction maintenance au sein d'une entreprise. Nous avons choisi deux complexes de production d'électricité qui seront nommées entreprise **A** et entreprise **B**.

Le choix des deux sociétés pour diagnostiquer les systèmes de maintenance regroupe les deux modes managements Publique et Privé. L'objectif est de refléter les différents cas de figure que dispose chaque mode de gestion des stratégies de maintenance des deux systèmes qualifiés complexes.

Les entretiens ont été effectués avec huit personnes qui sont des responsables, cadres et techniciens expérimentés des deux entreprises.

2. Présentation de la méthode ADEPA-CETIM

Nous allons utiliser le formalisme pour recenser l'état actuel du système de production, des ressources disponibles, de la façon dont les pièces de rechange sont gérées, des processus de maintenance déjà implantés et des priorités accordées aux équipements et leurs criticités.

Dans ce contexte, plusieurs travaux d'audit de la maintenance ont été élaborés. Nombreuses sont les entreprises qui ont développé leurs propres méthodes d'audit interne de leurs systèmes de production. Cependant, rares sont les travaux qui ont été publiés. Nous retenons spécialement dans ce contexte les travaux d'audit des deux organismes Français *ADEPA* & *CETIM*. Ils ont le mérite d'être parmi les rares références dans le domaine.

Le but de ce diagnostic est d'évaluer la fonction maintenance. Elle repose sur des travaux de recherche, des traitements d'avis d'experts, des expérimentations et une validation auprès des industriels. Elle permet de guider les entreprises qui veulent améliorer leur fonction de maintenance.

Dans le cadre de notre projet, cette démarche a pour but de faire le point sur l'état actuel de la fonction maintenance et de déterminer ses points faibles et ses points forts, mais aussi de justifier le besoin de la maintenance.

3. Principe du diagnostic de la fonction maintenance

L'objectif visé de cette partie du manuscrit de thèse est d'analyser de près la réalité des enjeux majeurs pour les décideurs et praticiens dans le domaine de la maintenance et spécialement pour le cas des systèmes complexes à travers le choix du domaine de production de l'électricité dans les centrales thermiques. Ce type d'industrie, fortement dynamique constituant ainsi un souci majeur dans l'approvisionnement en électricité dans le Maroc.

L'application de la méthode *ADEPA-CETIM* s'appuie sur l'évaluation de 8 marches de la fonction maintenance par un questionnaire constitué de 8 fiches.

Les marches qui illustrent les différentes activités du service sont :

- Gestion des équipements ;
- Maintenance 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} niveau ;
- Gestion de stock et pièces de rechange ;
- Gestion des travaux ;
- Analyse FMDS ;

- Analyse des coûts ;
- Base de données ;
- Planification/Prévention.

Nous traitons comme exemple, l'évaluation de la marche de gestion des équipements. La fiche d'enquête est remplie avec l'aide des six Responsables des deux entreprises.

La réponse pour chaque question peut être :

- **Vraie** : l'affirmation est rigoureusement exacte. Elle est toujours vérifiée dans l'entreprise.
- **Plutôt vraie** : l'affirmation est exacte, mais pas toujours vérifiée dans l'entreprise.
- **Plutôt fausse** : l'affirmation est fausse, mais elle peut être vérifiée quelquefois.
- **Fausse** : l'affirmation est totalement fausse. Elle n'est jamais vérifiée dans l'entreprise.

Nous donnons ci-dessous la fiche d'enquête, dûment remplie qui concerne la gestion des équipements :

Tableau 5: Évaluation de la marche de gestion des équipements selon ADEPA-CETIM

	Affirmation concernant la gestion des équipements	Vrai	Plutôt vrai	Plutôt Faux	Faux
1	On a un inventaire par emplacement, ligne... des équipements				
2	Cet inventaire est tenu à jour (modifications, suppressions, ajouts...)				
3	Il existe une codification qui découpe les équipements jusqu'à la pièce de rechange				
4	Pour chaque équipement, on connaît les conditions de bon fonctionnement				
5	Pour chaque équipement, on connaît les conditions d'intervention				
6	Pour chaque équipement, on connaît les pièces de rechange nécessaires				
7	Pour chaque équipement, on connaît les outillages nécessaires				
8	Pour chaque équipement, on possède l'historique des travaux				
9	Les codes (équipements / sous-ensembles / pièces) sont facilement visibles				
10	Pour chaque équipement, on possède les plans et schémas à jour				
11	Il est possible de retrouver rapidement les interventions réalisées sur un équipement				
12	Pour chaque équipement, on connaît le degré d'urgence de réparation				
13	Les historiques sont analysés au moins une fois par an				
14	Chaque équipement possède un numéro d'identification unique				
15	Chaque équipement possède un dossier technique				

A chaque fiche d'enquête correspond une grille de correction. Pour la correction, il suffit de regarder où se situe la case cochée (*en termes de points*) puis d'établir le score de chaque marche.

Le tableau 5 correspond à la grille de correction de la marche de gestion des équipements.

Tableau 6: Grille de correction

	1	0.7	0.3	0
	Vrai	Plutôt vrai	Plutôt Faux	Faux
1		X		
2		X		
3			X	
4	X			
5		X		
6	X			
7	X			
8			X	
9		X		
10		X		
11			X	
12	X			
13		X		
14			X	
15		X		

Nous notons le résultat (P), où $P = (4 \times 1) + (7 \times 0,7) + (4 \times 0,3) = 10,1$ donc le niveau de maîtrise de cette marche est de $\frac{10,1}{15} = 67\%$

Ce résultat correspond à une des quatre catégories déterminées par un intervalle :

- Catégorie 1 : $P > 13$
- Catégorie 2 : $11,3 < P \leq 13$
- Catégorie 3 : $6 < P \leq 11,3$
- Catégorie 4 : $P \leq 6$

Pour notre exemple ci-dessus de la grille de **la gestion des équipements**, il est compris dans la catégorie 3.

Suivant la catégorie de la marche, on peut conclure sur sa performance :

- **Catégorie 1** : marche très bien maîtrisée ;
- **Catégorie 2** : marche suffisamment maîtrisée pour accomplir son rôle dans la fonction maintenance, mais nous pouvons l'améliorer ;
- **Catégorie 3** : marche moyennement maîtrisée, il faut rétablir les centres de faiblesses ;
- **Catégorie 4** : marche non maîtrisée pour satisfaire son rôle, il faut la rétablir point par point.

Tableau 7: Résultats de l'audit de la fonction maintenance de l'entreprise B

	Entreprise B	Niveau de maîtrise	Catégorie	Expertise	Note max.
Gestion des équipements	10,1	67%	3	9	15
Maintenance de 1er, 2ème et 3ème niveau	4,7	59%	2	4	8
Gestion des stocks et pièces de rechange	7,9	56%	2	6	14
Gestion des travaux	6,4	53%	3	8	12
Analyse FMDS	6,7	52%	3	8	13
Analyse des coûts	3,4	34%	3	5	10
Base de données	3,1	34%	3	7	9
Planification – prévention	5,5	42%	3	4	13

La colonne *Expertise* représente la référence de la méthode ADEPA-CETIM, elle sert de comparaison avec les résultats obtenus du diagnostic présentés par la colonne « Entreprise B ». Cette dernière reflète la situation en cours de la maintenance.

4. Analyse et suggestion d'amélioration

Grâce au diagnostic de la maintenance, nous pouvons analyser la situation exacte des 8 marches de la fonction maintenance à travers les centres forts et ceux de faiblesses.

Nous avons également établi un benchmarking entre les deux entreprises, le tableau 7 montre les résultats trouvés.

Tableau 8: Résultat du Benchmarking de la gestion de la maintenance des entreprises A & B

	Entreprise A	Entreprise B	Note maximale
Gestion des équipements	12,30	10,1	15
Maintenance de 1er, 2ème et 3ème niveau	5,80	4,7	8
Gestion des stocks	10,70	7,9	14
Gestion des travaux	11,30	6,4	12
Analyse FMDS	10,40	6,7	13
Analyse des coûts	6,40	3,4	10
Base de données	7,00	3,1	9
Planification - prévention	11,70	5,5	13

Pour mieux comprendre les résultats, nous avons utilisé le graphe radar, ce dernier comprend huit branches, chacune présente une marche. Il faut donc y reporter à chaque fois le total des points correspondant (obtenus dans le tableau 7).

Le graphe radar permet de se comparer les deux entreprises en termes de performances dans les huit marches de la fonction maintenance. Cette étude permettra également de disposer d'une idée plus claire sur les sources de forces à maintenir et les éventuelles opportunités d'amélioration à planifier selon la catégorie, c'est-à-dire la priorité à donner pour surmonter les contraintes liées à la performance du système maintenu.

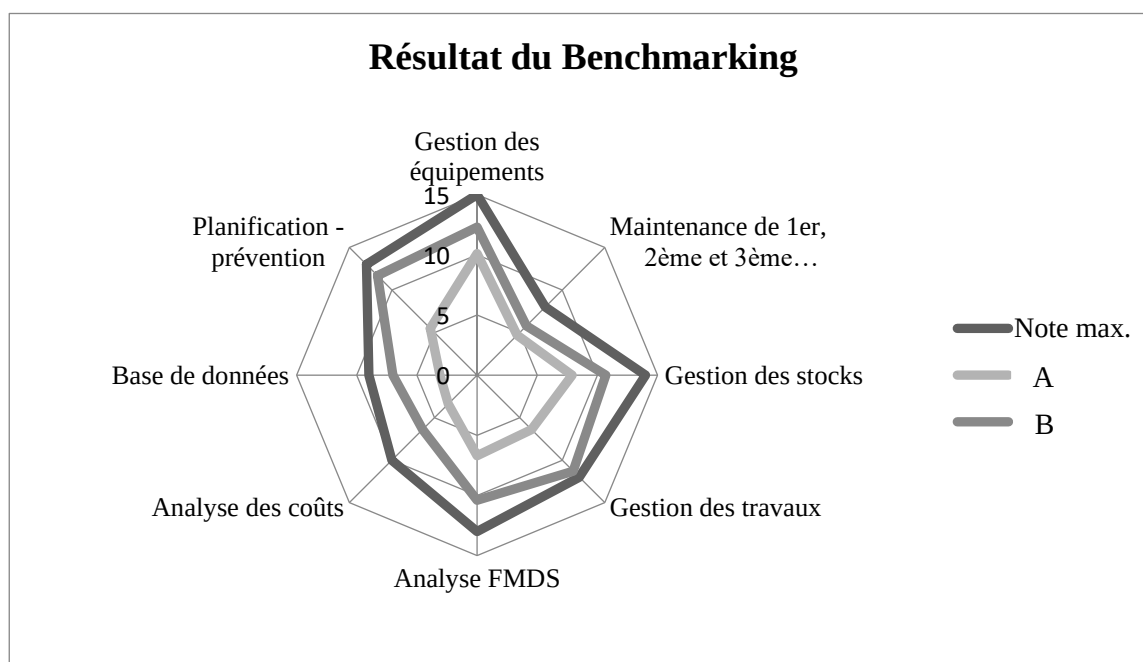


Figure 39: Graph radar du benchmarking

5. Formalisation des résultats issus du diagnostic

Le formalisme d'ADEPA-CETIM a été adopté en double objectif. Le premier est de recenser le besoin des décideurs et managers de maintenance. Ces données brutes sont exprimées dans le but de répondre aux différents enjeux quotidiens et stratégiques. Elles visent à expliciter l'opportunité de bien fonder une approche plus réaliste dans la formalisation du concept pour la modélisation et l'évaluation des stratégies de maintenance.

Le deuxième objectif est de refléter les systèmes industriels réels, avec les principaux modes d'exploitation et de maintenance. La particularité de la plupart des systèmes complexes est sa forte dynamique vis-à-vis des autres systèmes dits stationnaires. En plus, l'application du formalisme de diagnostic à un secteur en plein mouvement reflète une pertinente opportunité de rassembler le maximum d'information que les décideurs sont confrontés.

6. Exploitation des résultats de diagnostic de la fonction maintenance

Comme nous l'avons déjà évoqué dans les chapitres précédents. La plupart des modèles proposés par les chercheurs dans le domaine, prennent des cas d'études académiques ou des systèmes mono-composants avec des simplifications exagérées.

Dernièrement, avec l'avancée dans les technologies dans l'industrie, les systèmes industriels sont de plus en plus complexes. Ils produisent des données massives, qui restent, malheureusement, mal exploités dans le but d'interpréter les futures défaillances ou améliorations possibles.

Certains équipements disposent des mécanismes de protection, qui se déclenche suite à l'atteinte d'un seuil prédéfinie par le constructeur. Ces seuils restent inchangés dans un environnement de forte dynamique.

Une analyse de Sureté de fonctionnement ou une analyse FMDS (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité) est primordiale dans le processus de suivi des dégradations des systèmes. Cette partie se trouve généralement négligée ou réalisée en isolation avec les dépendances entre le matériel et les installations que compose le processus de production.

La figure 40 suivante est le fruit de cette partie du travail en vue de concevoir le modèle global d'évaluation et d'optimisation des stratégies de maintenance des systèmes complexes.

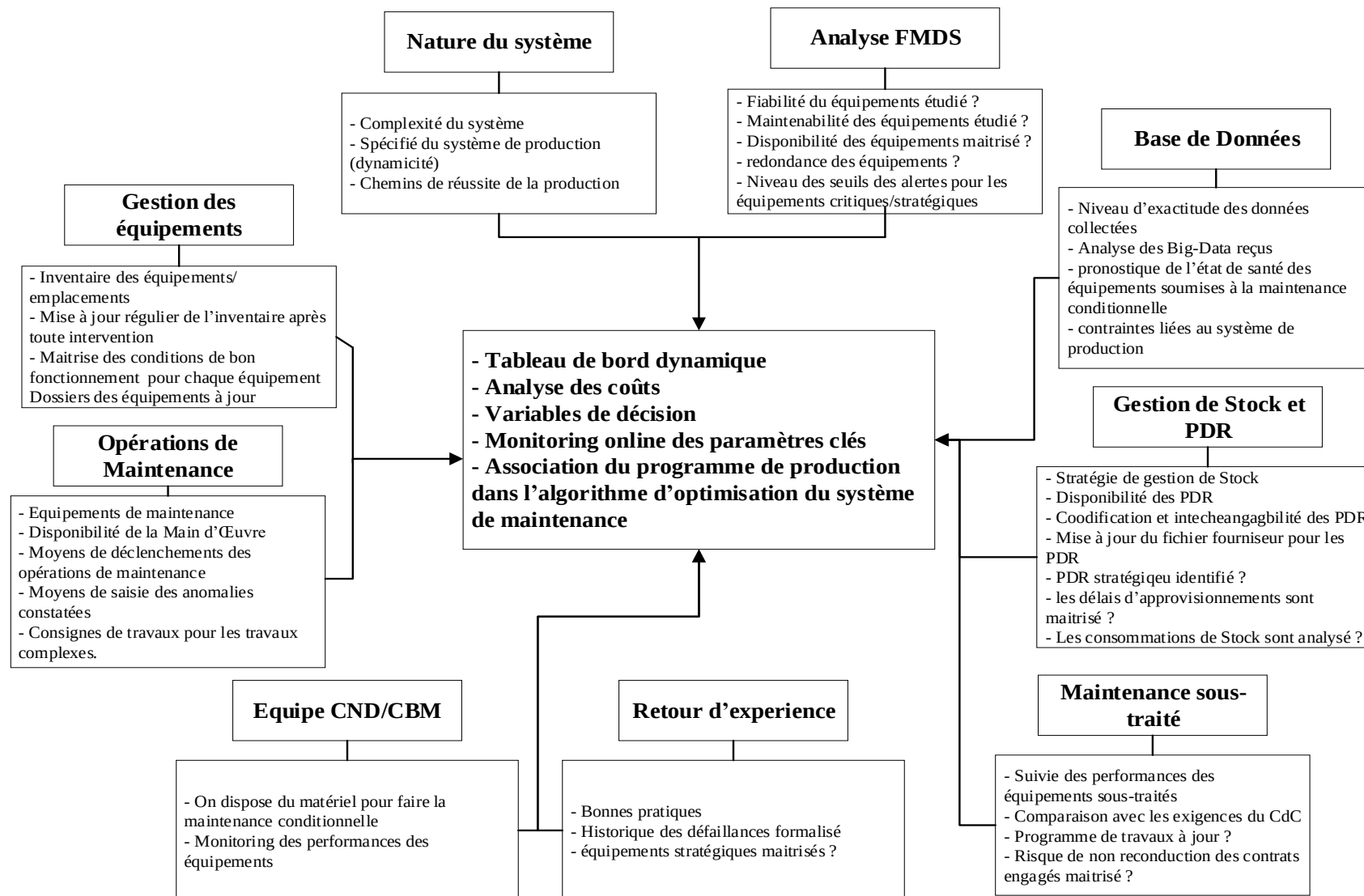


Figure 40: présentation des résultats de l'audit de la fonction maintenance

Les praticiens dans le domaine de la maintenance sont toujours confrontés à des conditions souvent antagonistes pour optimiser et justifier les choix de leurs stratégies de maintenance. Les résultats de notre diagnostic des différents aspects de la maintenance dans le cas des systèmes complexes nous a permis d'explicitier des recommandations clés pour la construction d'une vision holistique pour développer un modèle robuste qui tiendra compte, dans la mesure du possible, de ces paramètres.

Commençant par la **nature du système** étudié, il est nécessaire de mentionner le degré de complexité et les spécifications particulières de la chaîne de production étudiée pour extraire les chemins de réussite qui traduisent la disponibilité des moyens de production.

Une analyse de **Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité** (FMDS) est essentielle pour pouvoir déterminer le niveau de maîtrise de ces aspects appropriés et retenir les seuils constituant les limites pour déclencher les opérations de maintenance adéquates.

La gestion active de la **base de données** disponibles est considérée parmi les défis majeurs des chercheurs pour extraire le maximum des informations par l'interprétation en temps réel de ces données en vue de répondre à la dynamique des actions prévisionnelles à programmer pour opter sur le mix optimal des stratégies opportuns pour le système étudié.

La maîtrise du niveau de **stock** par l'approvisionnement optimal des consommables et les **pièces de rechanges** sont également considérées parmi les lacunes des modèles proposés. Or, un modèle qui tiendra compte du niveau de stock concernant les pièces de rechanges nécessaires pour effectuer les opérations de maintenance sera un ajout pour une recherche d'optimisation du choix des stratégies de maintenance adéquates. Les facilités offertes par les nouvelles plateformes de l'industrie 4.0 sont motivantes pour trouver les opportunités de partages entre les utilisateurs et fournisseurs du matériel nécessaire pour la maintenance.

La **sous-traitance** de la totalité ou d'une partie de la maintenance est un aspect important qui doit être maîtrisé par les entreprises qui veulent opter pour ce choix de politique. L'importance de ce volet non seulement de prendre en considération les indicateurs de performances contractuelles, mais également de formaliser les bonnes pratiques à travers le **retour d'expérience**, pour faire face aux risques de non reconduction des contrats objets de la sous-traitance.

La disposition des compétences pour effectuer les **contrôles** nécessaires pour la santé des moyens de production est un des soucis majeurs des décideurs qui veulent décider de façon proactive pour le choix

des stratégies de **maintenance conditionnelle** pour éviter les défaillances causantes des indisponibilités pénalisantes.

La prise en compte de tous ces paramètres pour concevoir un modèle permettant l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes complexes (ESMASYC) serait l'objectif du prochain chapitre. Il tiendra compte des résultats issus de l'analyse bibliographique auquel rajouté les exigences relatives aux utilisateurs dans le domaine de la production de l'énergie électrique dans les centrales thermiques au Maroc.

Conclusion

Après avoir parcouru les travaux actuels de recherche traitant la modélisation et l'évaluation des stratégies de maintenance, nous avons associé dans ce chapitre l'approche pratique à travers l'adoption d'une méthode de diagnostic reconnue de la fonction maintenance. Un questionnaire réparti sur les huit principaux piliers de la fonction maintenance et son interaction avec les autres processus comme la logistique, la sécurité et la gestion des bases de données.

Cette étude a rassemblé des managers et techniciens expérimentés dans le domaine de la production de l'électricité dans des centrales électriques qui sont ainsi des systèmes d'ordre complexe.

Les résultats obtenus ont été présentés et exploités. Ces derniers sont en fait le fruit de cette partie qui sera transformée sous formes de principales exigences à retenir pour la construction de la démarche holistique pour la modélisation des stratégies de maintenance des systèmes complexes.

Dans le prochain chapitre, nous regroupons les données collectées pour répondre à l'objectif initial de nos travaux de recherches par la proposition du modèle ESMASYC.

CHAPITRE IV : PROPOSITION D'UNE DEMARCHE POUR L'EVALUATION DES STRATEGIES DE MAINTENANCE DES SYSTEMES COMPLEXES (ESMASYC)

Introduction

La construction du modèle pour l'évaluation et l'optimisation des stratégies de maintenance est l'objectif de ce chapitre. Nous allons présenter premièrement le cadre de modélisation global pour ensuite expliciter les exigences relatives à la conception de l'approche de modélisation. Les étapes de chaque partie sont détaillées pour faciliter la compréhension de la méthodologie adoptée.

En plus de l'approche développée au niveau stratégique du management de la maintenance, nous avons également visé le niveau technique par l'introduction de notre concept pour la caractérisation des perturbations responsables des phénomènes de défaillances cachées déjà expliqué. Nous soulignons, à ce niveau, l'utilisation de l'approche de modélisation des systèmes multi-énergie par les Bond Graphes. Nous donnons un exemple pour démontrer l'utilisation de cette approche dans le diagnostic des perturbations mécaniques dans les systèmes industriels.

1. Formulation du cadre de modélisation global pour l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes complexes

Pour pouvoir décrire le modèle global, nous avons exploré les travaux similaires récents dans la littérature, aussi bien les livres de références dans la modélisation conceptuelle des systèmes en vue de simulation. Le modèle devra contenir les exigences déduites de notre recherche bibliographique et également les résultats des entretiens menés avec les responsables et décideurs dans l'industrie d'énergie au Maroc.

Une fois le modèle d'évaluation des stratégies de maintenance est préconçu, la prochaine étape est de cerner les volets à traiter tenant compte de notre objectif consacré aux systèmes complexes. Nous décrivons ci-dessous les défis à relever pour concevoir ledit modèle :

- L'aspect dynamique et le Diagramme de fiabilité ;
- L'aspect de complexité des interactions entre le matériel ;
- La difficulté de prévisions des pannes (phénomènes des défaillances cachées) ;
- La difficulté d'adopter un modèle flexible pour un ensemble de processus ;
- L'adaptation d'une optimisation multi-objective (au lieu de celle mono-objective) ;
- L'incorporation du modèle avec les données issues du progiciel GMAO ;
- La simplicité d'interprétation des résultats de simulation ;

- La prise en compte des délais d'approvisionnement, de durée de vie et le taux de dégradation du matériel ;
- La disposition de nouvelles méthodes de maintenance dites intelligentes ;
- La prise en considération du retour d'expérience formalisé de l'historique des événements ;
- La possibilité d'intégrer les processus sous-traités dans le modèle (type des contrats à obligation de résultat) ;
- La prise en compte des outils de l'intelligence artificielle dans l'exploitation des données de monitoring des installations et les performances d'exploitation.

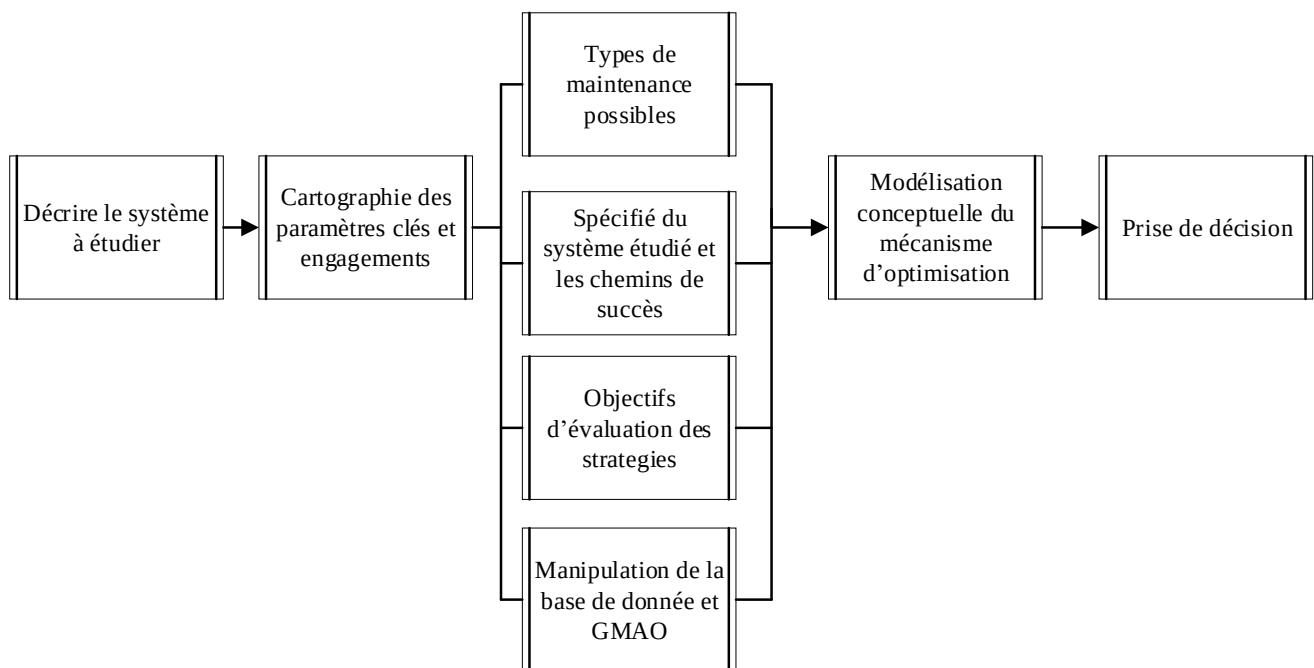


Figure 41: Cadre global du modèle d'évaluation des stratégies de maintenance

Pour pouvoir structurer les exigences explicitées ci-dessus, nous avons élaboré le tableau 8 qui décrit entre autres les solutions envisagées pour atteindre lesdites exigences :

Tableau 9: Exigences et solutions proposées

Exigences	Solutions envisagées
1- L'aspect dynamique et le Diagramme de fiabilité ;	- Retenir une approche multicritère qui prend en considération la dynamique du système étudié ; - Incorporer une analyse de fiabilité du système étudié.
2- L'aspect de complexité des interactions entre le matériel ;	- Dessiner les chemins de succès du système complexe ; - Élaborer les arbres de défaillances correspondantes ; - Extraire les relations entre le matériel du système complexe.
3- La difficulté de prévisions des pannes (phénomènes des défaillances cachées) ;	- Construire une application qui gère le paramétrage des différents observateurs du système et son étalonnages périodiques ; - Chercher une méthode de diagnostic adaptée aux systèmes complexes
4- La difficulté d'adopter un modèle flexible pour un ensemble de processus ;	- Retenir une approche par processus qui rend la compréhension facile du modèle ; - Retenir une approche basée sur les systèmes à événements discret qui décrit ces processus.
5- L'adaptation d'une optimisation multi-objective (au lieu de celle mono-objective) ;	- Appliquer une analyse multicritère des équipements pénalisants (Exemple du Méthode 20/80) - Adopter une approche d'optimisation multi-objective seulement pour ces équipements pénalisants

Exigences	Solutions envisagées
6- L'incorporation du modèle avec les données issues du progiciel GMAO ;	- Concevoir le modèle de simulation d'une manière qui facilite l'adaptation avec les progiciels de Maintenance Assisté par Ordinateur
7- La simplicité d'interprétation des résultats de simulation ;	- Exploiter l'avantage d'animation des systèmes à événements discrets et la modélisation 3D des processus par les logiciels disponibles ; - Présenter les résultats de simulation sous forme de graphique associée aux critères optimisés durant la simulation.
8- La prise en compte des délais d'approvisionnement, de durée de vie et le taux de dégradation du matériel ;	- Rajouter aux contraintes et variables de la fonction objective les résultats de l'étude de fiabilité
9- La disposition de nouvelles méthodes de maintenance dites intelligentes ;	- Étudier la possibilité d'introduire les nouvelles plateformes de maintenance basée sur l'internet des objets (IoT) et l'E-maintenance
10- La prise en considération du retour d'expérience formalisé de l'historique des événements ;	- Considérer le retour d'expérience comme une source d'information à rajouter au modèle proposé
11- La possibilité d'intégrer les processus sous-traités dans le modèle (type des contrats à obligation de résultat).	- Visualiser les processus sous-traités dans l'interface du modèle de simulation. - Superviser les exigences relatives aux contrats de maintenance de ces processus.

Exigences	Solutions envisagées
12- L'implication des techniques de l'intelligence artificielle dans la manipulation de données issues des instruments de mesures on-line et offline.	- Prévoir des modules de traitement des bases de données utilisant les techniques de l'intelligence artificielle pour l'exploitation de ces données et regrouper dans des clusters ayant des critères de sélection adoptés au cas d'étude. - Associer les avantages de la modélisation à événements discrets avec les techniques du Machine Learning (ML) pour enrichir la base de données de sélection multicritères des stratégies de maintenance optimales.

2. Formalisation du modèle d'évaluation des stratégies de maintenance proposé

Notre objectif est de bien concevoir le modèle comportant les spécifiés relatives aux systèmes complexes. Il tiendra compte également des limitations figurées ci-dessous.

Pour bien cerner le cadre global de modélisation, nous allons nous référer à la figure 42 qui détaille les phases principales de développement du modèle.

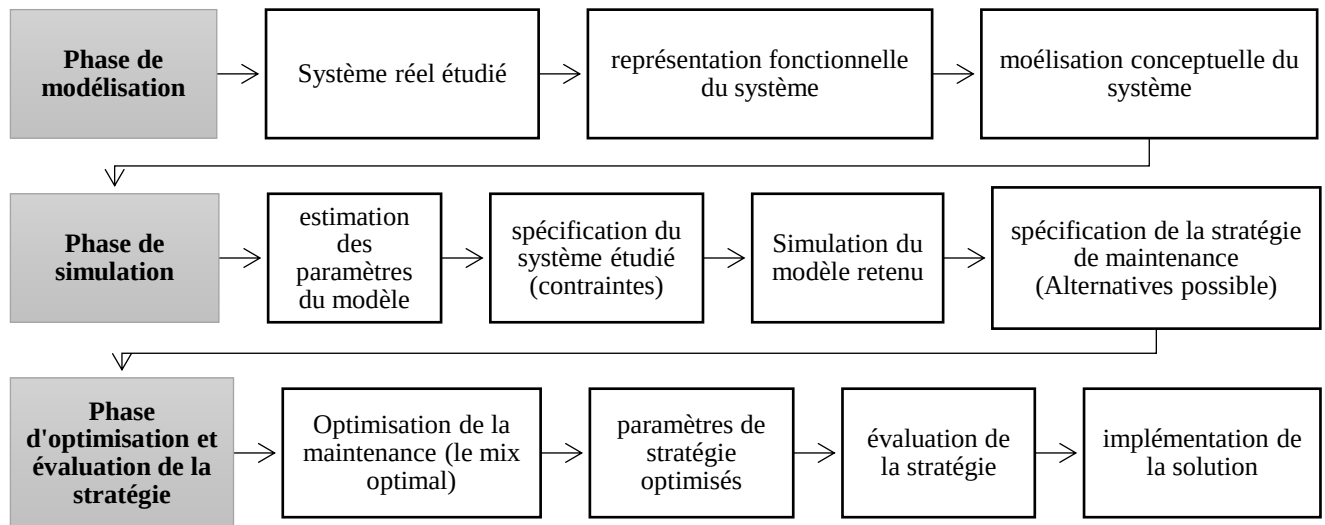


Figure 42: Cadre de modélisation et évaluation d'une stratégie de maintenance

Dans un premier temps, nous allons présenter notre approche sous forme d'une modélisation boîte noire qui relie les entrées avec les sorties sans pouvoir identifier le fonctionnement exact de cette transformation.

Les exigences sont formalisées par les vecteurs de pilotages et supervisées par les performances souhaitées par les utilisateurs selon les possibilités offertes.

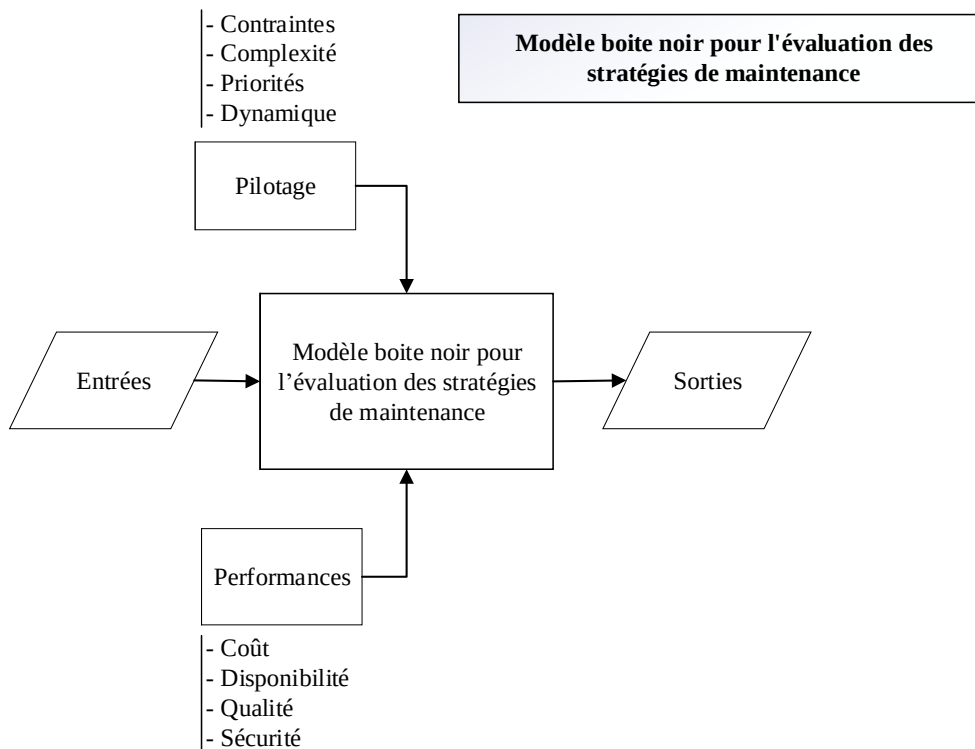


Figure 43: modèle boîte noire pour l'évaluation des stratégies de maintenance

En vue de prendre les bonnes décisions pour implémenter des stratégies de maintenance optimales dans le cadre des systèmes complexes, une étude du terrain est bien obligatoire pour extraire les données et contraintes réelles du terrain. Ces dernières sont à contextualiser dans le cadre du modèle conçu pour pouvoir effectuer les simulations via les algorithmes adéquats.

Ces informations sont principalement relatives avec les stratégies de maintenance applicables dans l'entreprise et également avec l'existant en termes de l'état de santé des installations ou équipements à maintenir selon les performances souhaitées.

La figure 44 schématise les interactions entre ces éléments avec l'algorithme d'optimisation.

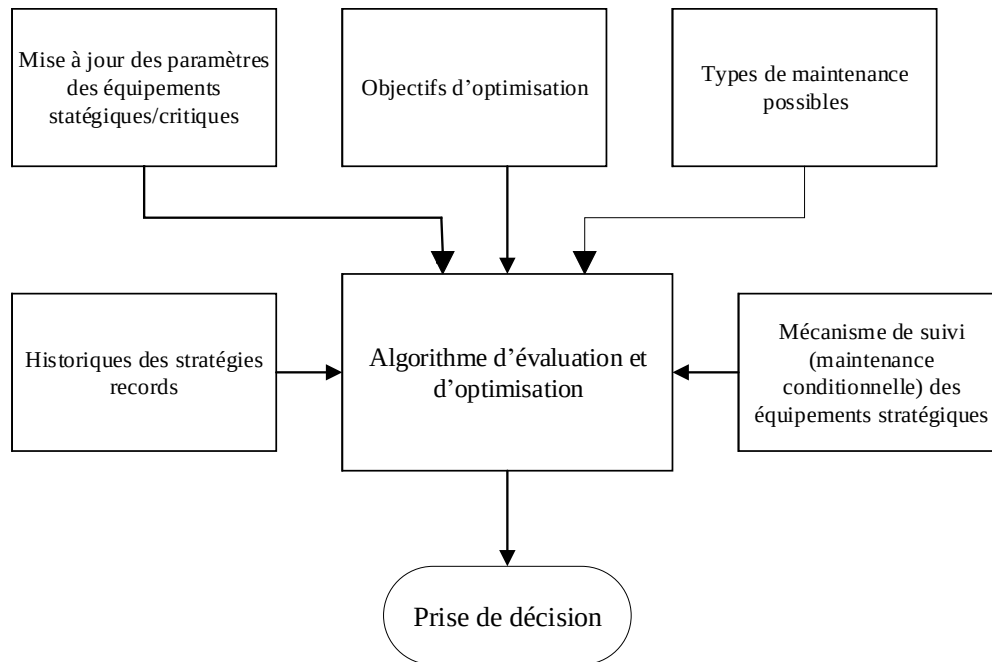


Figure 44: Élaboration de l'algorithme d'optimisation d'évaluation des stratégies de maintenance

3. Modèle global de modélisation et d'évaluation

Après avoir identifié les différentes parties de construction du modèle pour l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes complexes. Nous avons pour objectif dans la présente étape de rassembler le modèle global en se basant les opportunités de recherche déduites de la recherche bibliographiques, mais également des exigences relatives aux questionnaires dédiés aux utilisateurs (responsables et décideurs).

La figure 45, résume le modèle global, à haut niveau, pour la modélisation et l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes complexes que nous allons détailler dans les sections qui suivent.

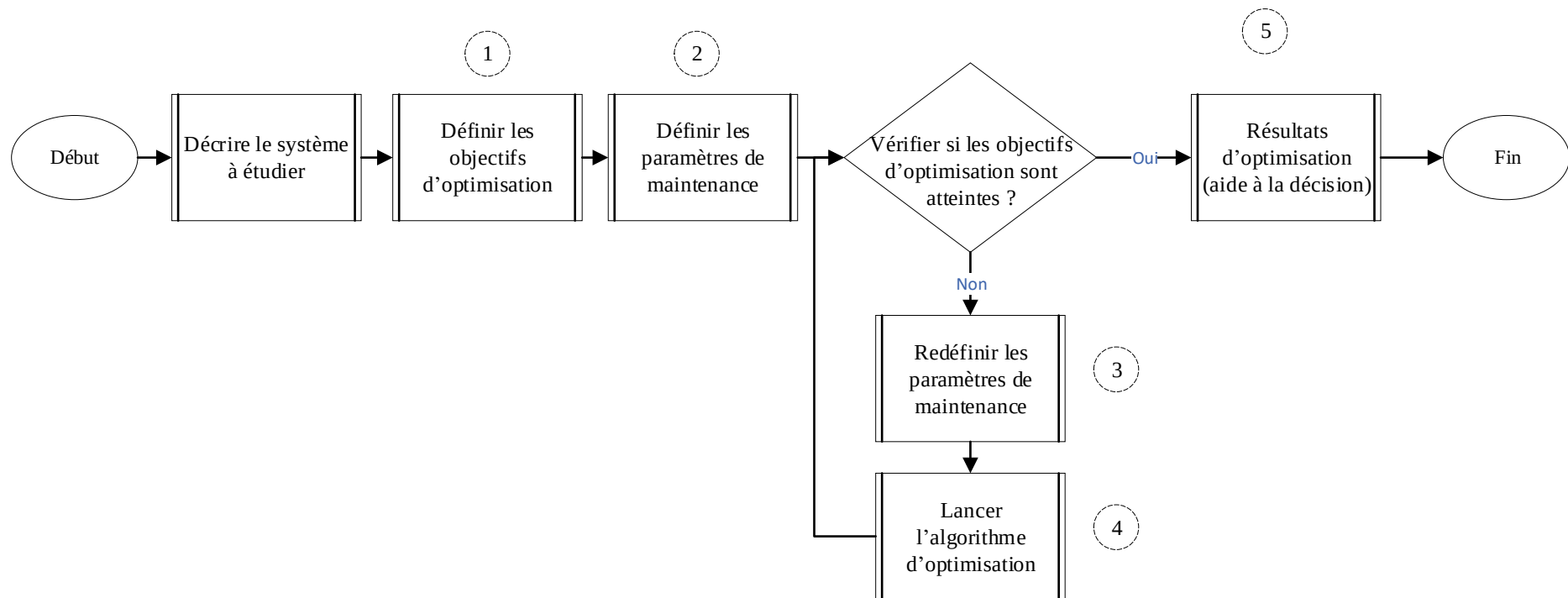


Figure 45: Modèle globale de modélisation et d'évaluation

2.1.Définir les objectifs de simulation

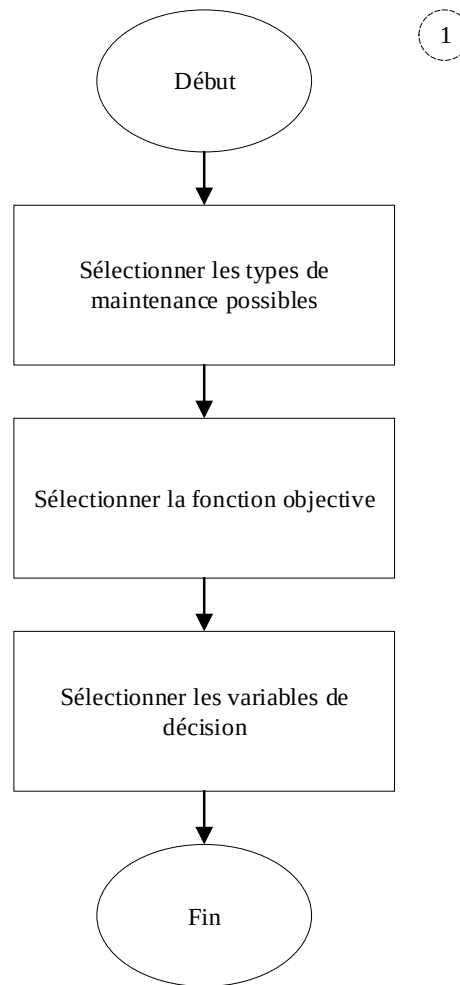


Figure 46: Objectifs de simulation

L'évaluation des stratégies de maintenance appliquées dans un système donné est abordée sur plusieurs niveaux par les chercheurs. Nous sommes intéressés dans notre travail de recherche plus particulièrement au niveau managérial, mais également nous introduisons la partie technique via une approche générique pour le diagnostic des perturbations des systèmes mécaniques par l'utilisation des Bond Graphes (BG), qui est une méthode de représentation graphique des systèmes multi-énergies.

Avant de se lancer dans l'optimisation, la définition des stratégies de maintenance applicable au système est primordiale. Le but de cette phase est de décrire ces stratégies, ainsi de retenir les statistiques correspondantes en termes de périodicité pour la maintenance préventive et les seuils de limites pour la

maintenance conditionnelle et éventuellement le temps d'intervention normal en cas de maintenance corrective.

Pour retenir la fonction objective, les indicateurs de performances doivent être formulés de telles façons de situer l'état actuel avec celui prévue derrière le travail d'optimisation. Il est donc judicieux de mener les entretiens nécessaires pour formaliser la fonction objective avec les décideurs concernant la ou les parties à étudier.

L'expression de la fonction objective permettra alors d'explicitier les variables de décisions émanant du terrain. Ces variables doivent être mesurables avant qu'ils soient exploitables dans la suite du travail.

2.2. Définir les paramètres de maintenance

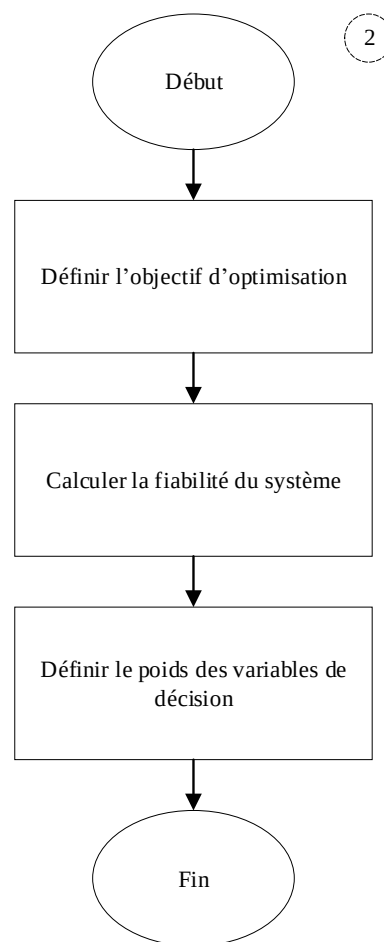


Figure 47: Paramètres de maintenance

Compte tenu de l'organigramme simplifié ci-dessous, nous visons à bien cerner premièrement l'objectif d'optimisation souhaitée. Cette phase nous permettra de se lancer dans la partie d'étude de fiabilité du système étudié. Or, la fiabilité des systèmes complexes a été largement abordée par les chercheurs et développeurs de solutions au profit des organisations.

Parmi les premiers organismes qui ont développé et appliqué la maintenance basée sur la fiabilité est l'Électricité de France (EDF) dès les années 90 [118].

Le cahier présenté par [118] de la revue Techniques de L'ingénieur, reporte l'historique des travaux qui ont été menés pour l'optimisation de la maintenance jusqu'au concept basé sur la fiabilité qui a été nommée par EDF par « Optimisation de la Maintenance Basée sur la Fiabilité » (OMF).

La démarche OMF s'articule principalement sur des axes clés qui visent de maîtriser la fiabilité du système à travers la décomposition du système en plusieurs niveaux. Ces derniers sont exploités via l'analyse des modes de défaillances et leurs criticités (AMDEC), le Retour d'expérience formalisé (REX) et les dossiers constructeurs dont figurent les préconisations de bon fonctionnement des équipements.

Dans notre cas d'étude, pour répondre aux exigences soulignées, nous avons également utilisé cette approche de fiabilité du système qui reflète l'approche OMF à travers la construction d'un arbre de défaillance de la partie du système à optimiser. Or, dans notre contexte et compte tenu de la forte dynamique des systèmes complexes, nous proposons de rajouter au principe classique des arbres de défaillances (ADS), l'approche des portes dynamiques de liaisons entre les symptômes d'étude de défaillances.

L'objectif derrière l'application des « Arbres de Défaillances Dynamiques » (ADD) est de refléter la dynamique du modèle pour en tenir compte des variations qui peuvent avoir lieu dans la réalité du terrain. Plusieurs travaux de recherche ont abordé ces ADD [118]–[121], ces derniers montrent les avantages de cette méthode dans la formulation des meilleurs scénarios qui peuvent avoir lieu, plus particulièrement pour les systèmes complexes.

Les ADD rajoute au formalisme des ADS de nouvelles portes qui ont la capacité de modéliser les dépendances entre matériel du système dans un ordre événementiel. Ces derniers sont les suivantes :

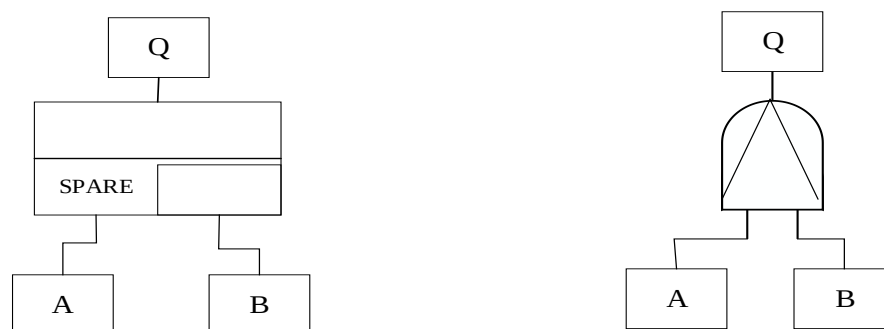


Figure 48 : Portes dynamiques SPARE & PAND

- La Porte dynamique SPARE : signifie que A est actif tandis que B est en Standby. B devient actif si A se déclenche. Cette méthode permet alors de tenir en compte la redondance des équipements d'un système complexe.
- La porte dynamique PAND (priorité AND) : c'est la porte logique « ET » avec une priorité de « A avant B »

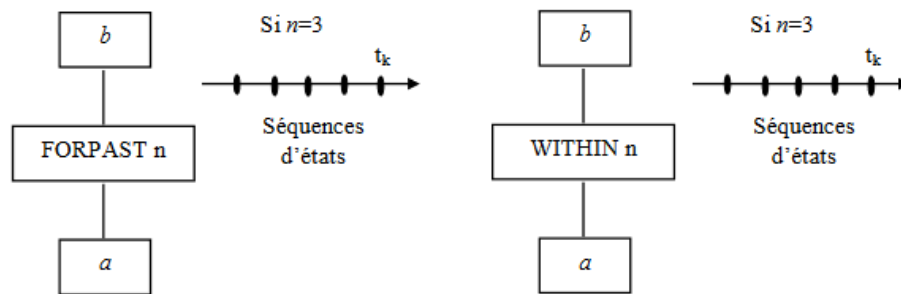


Figure 49: Portes temporelles

Les deux portes temporelles signifient respectivement :

- B est vrai si A est vrai à l'instant présent et les n instants passés ;
- B est vrai si, soit A est vrai à l'instant présent ou aux n instants passés.

La dernière phase dans cette partie est de déterminer les poids des variables de décision retenus. Nous voulons dire par « poids du variable » son pertinence dans l'étude l'optimisation. Cette résolution a été instaurée du fait que l'optimisation dans les équipements les plus pénalisants résulte des économies remarquables par rapport à d'autres équipements.

Cette partie est introduite via une analyse de criticité de la défaillance d'un équipement sur la marche normale du système à optimiser, puis une note de criticité pour être accorder tenant compte de la conséquence de la défaillance de l'équipement sur la disponibilité et la performance du système.

2.3. Paramètres de maintenance choisies et algorithme d'optimisation

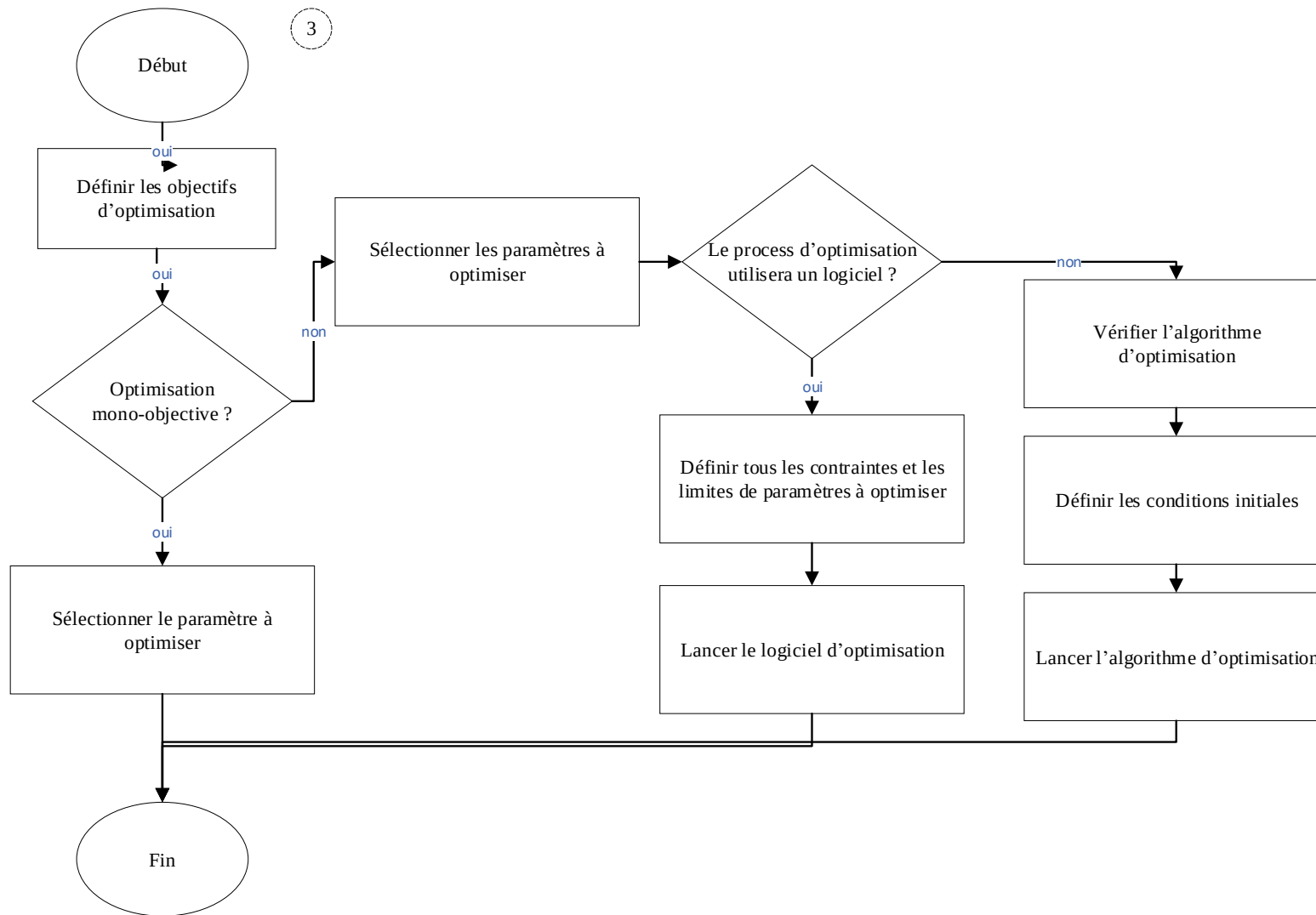


Figure 50: Paramètres de maintenance et algorithmes d'optimisation

L'évaluation de la stratégie appliquée peut être exploitée selon le cas d'étude qui peut être une approche mono-objective ou celle multi-objective.

Le choix est alors spécifié dans les phases précédentes lors de la définition des variables de décisions et ces poids correspondants. Plusieurs logiciels sont disponibles dans le marché pour une recherche d'optimisation. Les critères mentionnés ci-dessus aideront à sélectionner le logiciel opportun pour lancer les travaux d'optimisation. Des algorithmes connus dans la littérature ont été reporté dans le travail de recherche bibliographique [122], aussi bien nous avons indiqué dans les annexes 2 & 3 les logiciels populaires et leurs capacités dans les travaux de simulation et d'optimisation. La sélection du logiciel d'optimisation se fait alors à travers un questionnaire du contexte d'utilisation, de la disponibilité et d'autres éventuels critères personnalisés.

L'algorithme d'optimisation est choisi en fonction de la nature du problème à traiter tout en tenant compte des informations disponibles et les contraintes relatives au logiciel de simulation choisie.

2.4. Présentation et interprétations des résultats d'aide à la décision

Cette dernière partie du modèle proposé a pour but de rassembler les résultats d'optimisation, puis de les présenter de façon à pouvoir faire une comparaison avec l'historique disponible. La comparaison des résultats de simulation doit se faire tenant compte des mêmes contraintes envisagées dans les anciennes expériences d'optimisation, c'est-à-dire que tout changement des données d'entrées tel que des changements ou modifications dans le système entraîne également des changements dans les résultats de simulations. Une autre phase importante dans la vérification de l'exactitude du modèle d'optimisation est l'analyse de sensibilité qui est une méthode dont le but principal est de vérifier l'impact de l'incertitude des données d'entrées dans un modèle sur les résultats de sorties correspondantes.

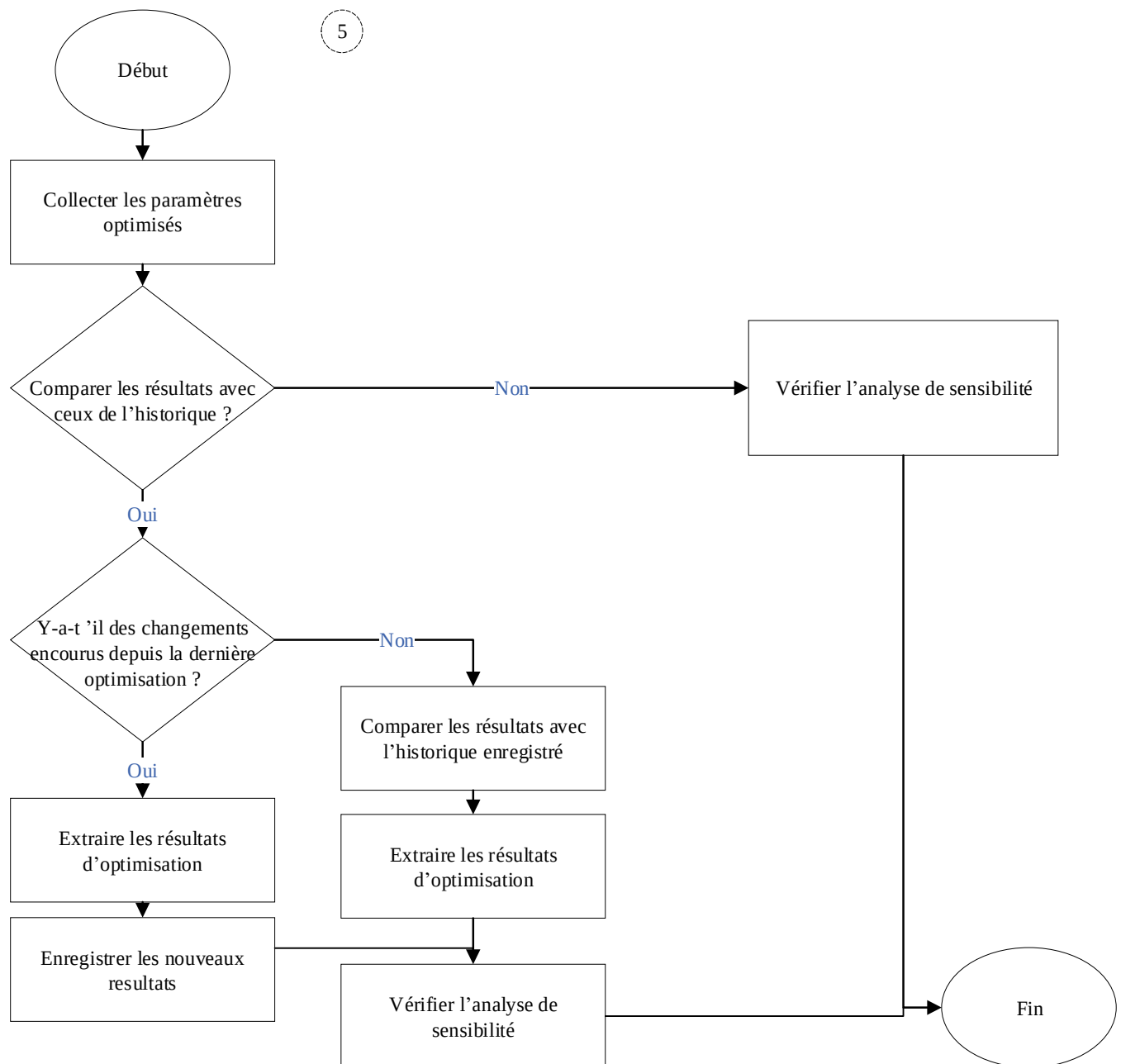


Figure 51: Présentation et interprétations des résultats d'aide à la décision

Il est également possible via l'analyse de sensibilité de visualiser la pertinence d'incertitudes des données d'entrées, qui sont les variables de décisions dans le modèle, sur les résultats de simulation.

Cette technique a été largement bénéfique dans plusieurs applications, à savoir [123], [124]:

- Outil d'aide à la décision pour les spécialistes dans un tel domaine ;
- Outil de mesure de la robustesse d'un modèle ou d'un système dans un environnement d'incertitude ;

- Une maîtrise des relations entre l'entrée et la sortie des variables dans un système ou d'un modèle ;
- La réduction d'incertitude, à travers l'identification des entrées du modèle qui causent une incertitude importante dans la production et devrait donc être le centre de l'attention ;
- La recherche d'erreurs dans le modèle (par la rencontre inattendue des relations entre les entrées et les sorties) ;
- La simplification du modèle, en fixant les entrées qui n'ont pas d'effet sur la sortie, ou en identifiant et en supprimant les parties redondantes de la structure du modèle ;
- L'amélioration de la communication entre modélisateurs et décideurs (par exemple en formulant des recommandations plus crédibles, compréhensibles, irrésistibles ou de persuasion) ;
- Trouver des régions dans l'espace des entrées pour lesquelles la sortie du modèle est maximale ou minimale, ou répond à un certain critère d'optimalité ;
- Pour la calibration des modèles avec un grand nombre de paramètres, une analyse de sensibilité peut faciliter le réglage des paramètres en se concentrant sur les paramètres sensibles. Sans connaître la sensibilité des paramètres, beaucoup de temps et d'effort peuvent être gaspillés pour régler des paramètres peu sensibles ;
- Chercher à identifier les liens importants entre les observations, les entrées du modèle, et des prédictions ou des prévisions, conduisant à l'élaboration de meilleurs modèles.

3. Analyse des perturbations des Systèmes Complexes par utilisation des Bond Graphes

Comme nous l'avons déjà cité précédemment, nous avons rajouté au niveau managérial, une approche générique, au niveau technique, qui classifie les perturbations mécaniques en vue d'analyse par l'outil BG.

Nous détaillons ci-dessous l'application de la méthode BG et le modèle proposé pour la classification des perturbations. Cette contribution a pour but essentiel de disposer d'un outil qui pourra être utilisé comme outil d'aide à la décision, surtout quand il s'agit des systèmes complexes.

3.1. Utilisation des Bond Graphes et ses avantages

3.1.1. Besoin d'un outil pour modélisation des interactions dans les systèmes complexes

Concevoir de nouveaux produits, améliorer les systèmes déjà utilisés et maîtriser les risques sont des problèmes majeurs pour les chercheurs en développement et les ingénieurs du secteur industriel. Cela passe par plusieurs phases dont la phase de modélisation utilisant des représentations mathématiques souvent lourdes et compliquées. Depuis les années quatre-vingt-dix, le professeur Karnop a formalisé les travaux de recherche du professeur Paytner en introduisant l'outil de modélisation Bond Graphs basé sur l'idée de transmission de puissance entre les sous-systèmes. Cette approche de modélisation est intéressante non seulement en termes de facilité de représentation, mais également en termes d'utilisation de principes de physique communs à différentes disciplines [125]

Une enquête dans la littérature met en évidence la demande croissante d'acquérir de nouveaux outils de modélisation dans les systèmes multi-énergies. La section de perturbation est l'une des contraintes les plus importantes pour garantir les performances des équipements complexes dans le cadre des politiques de maintenance classiques et de la détection de pannes avec des stratégies de diagnostic.

Dans cet article, nous discutons de l'objectif d'utiliser l'outil de BG comme diagnostic des fautes en introduisant nos trois lois des comportements de perturbation dans les systèmes mécaniques. L'utilisation du BG est fortement recommandée dans les systèmes mécatroniques et d'autres domaines de l'ingénierie [126] ; nous sommes intéressés à décrire notre concept original dans le domaine des perturbations mécaniques.

Une étude de cas est présentée avec les différents critères mentionnés et discutés dans la vision pour être généralisée par d'autres systèmes mécaniques.

Cette partie est structurée comme suit. La section 2 traite de l'outil BG et de ses différentes lois. Les variables clés dans le domaine mécanique et leur description sont présentées dans la section 3. Le concept de perturbation et l'approche de modélisation sont discutés dans la section 4. La section 5 explore les différents concepts de comportement perturbateur en présentant une étude de cas du système masse-ressort. Trois cas sont illustrés avec des chiffres et des critères équivalents. Enfin, la section 6 fournit un résumé des résultats.

De nombreux auteurs ont déjà réalisé un aperçu des lois de construction d'un modèle de BG. Les auteurs dans [125] est le fondateur du langage de modélisation BG.

3.1.2. Avantages de l'utilisation de Bond Graph

Ces avantages peuvent être résumés principalement [127]–[129]. Un langage unifié pour tous les domaines des sciences de l'ingénieur. Il s'agit d'une approche structurée de modélisation et de simulation de systèmes dynamiques, mais elle repose essentiellement sur la caractérisation du phénomène d'échange d'énergie dans le système. L'une des puissances de BG peut être esquissée sans écrire ni calculer des équations complexes, une déduction possible de schémas fonctionnels, des équations d'état permettant une simulation directe via un logiciel conçu à cet effet.

3.2. Modèle de représentation pour Bond Graph

Le modèle Bond graphs (BG) est une représentation graphique de systèmes dynamiques [126], [130], [131] formés par des jonctions d'éléments de base. Chaque jonction représente un transfert de puissance entre les éléments connectés. Ce transfert de puissance est modélisé par une demi-flèche précédée d'une source d'effort ou d'une source d'écoulement, tandis que le sens de l'écoulement est orienté par la demi-flèche.

Dans une présentation graphique utilisant le modèle Bond Graph, les éléments de base pour la construction du modèle peuvent être résumés comme suit :

$$S = \{R \cup C \cup I \cup TF \cup GY \cup Se \cup Sf \cup De \cup Df \cup J\}$$

L'élément R représente une dissipation passive d'énergie, tandis que les éléments C et I sont des modèles d'énergie stockée. TF et GY sont utilisés pour représenter les transformateurs et les gyrateurs. Les entrées d'un tel système sont introduites par une source d'effort (Se, MSe) et une source de flux (Sf, MSf). Les deux types de jonction 1 (respectivement 0) servent à rassembler les éléments de BG qui partagent le même flux (respectivement même effort), la mesure du débit (respectivement De).

3.2.1. Domaines physiques et variables dans le modèle Bond Graph

La modélisation par les BG offre une grande flexibilité de modélisation des systèmes multi-domaines. Les règles de construction du modèle basées sur le transfert d'énergie en utilisant les différentes variables sont résumées ci-dessous [125] :

Tableau 10: Variables d'efforts et de flux utilisés dans les Bond Graphes

Domaine	Effort e	Flux f
Electrique	Voltage u	Courant i
Mécanique de translation	Force F	Vitesse v
Mécanique de rotation	Couple C	Vitesse de rotation w
Hydraulique & pneumatique	Pression P	Flux volumétrique qv
Thermique	Température T	Entropie qS
Chimique	Potentielle Chimique m	Flux molaire qm

En mécanique de translation, le tableau 10 récapitule les paramètres adaptés à la modélisation BG :

Tableau 11: Différents paramètres des BG dans la mécanique de translation

Variable	Notation	Translation
Effort	$e(t)$	Force F
Flux	$f(t)$	Vitesse v
Moment	$p(t) = \int e(t)dt$	Impulsion ρ
Déplacement	$q(t) = \int f(t)dt$	Distance x
Puissance	$P(t) = e(t) \times f(t)$	$F(t) \times v(t)$
Énergie	$E(p) = \int fdp ; E(p) = \int edq$	$E_c = \int vdp ; E_p = \int Fdx$

Tableau 12 : Différentes paramètres des BG dans la mécanique de rotation

Variable	Notation	Rotation
Effort	$e(t)$	Couple Γ
Flux	$f(t)$	Vitesse angulaire ω
Moment	$p(t) = \int e(t)dt$	Moment cinématique σ
Déplacement	$q(t) = \int f(t)dt$	Angle θ
Puissance	$P(t) = e(t) \times f(t)$	$\Gamma(t) \times \omega(t)$
Énergie	$E(p) = \int fdp ; E(q) = \int edq$	$E_c = \int \omega d\sigma ; E_p = \int \Gamma d\theta$

Nous pouvons conclure que la fonctionnalité permettant de décrire l'interaction du sous-système afin de modéliser l'ensemble du système est possible grâce à des variables clés et aux avantages offerts par les recherches sur le terrain.

3.3. Description de la nature de la perturbation dans les systèmes mécaniques

Les perturbations sont omniprésentes dans tout phénomène physique dans lequel on distingue celles d'origine externe et celles d'origine interne dans les systèmes. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux perturbations mécaniques concernant principalement les systèmes dynamiques. Les différents types de perturbations mécaniques sont matérialisés par des incertitudes qui perturbent à la fois la fonctionnalité et les performances des systèmes. Dans l'approche du contrôle robuste, nous distinguons les incertitudes paramétrées des incertitudes dynamiques. Cela nous permet de découvrir la forme de ces perturbations afin de tirer profit de notre représentation de la BG.

Une recherche bibliographique dans le domaine des perturbations nous a permis de tirer certaines conclusions, en particulier les perturbations ont des effets directs sur la fonctionnalité d'un système ; leur identification n'est pas toujours simple, leur modélisation à l'aide d'équations mathématiques est également complexe.

3.4. Approche de modélisation des perturbations par les Bond Graphes

L'objectif de cette partie du travail est d'analyser et de traiter les perturbations dans les systèmes mécaniques à l'aide du puissant outil Bond Graph. Ce langage de modélisation nous permet d'établir une vue synthétique de la réalité physique des systèmes ainsi que des modèles mathématiques correspondants. Tout le monde a une idée préconçue sur les perturbations, car elles font partie de notre vie quotidienne. Celles-ci sont parfois identifiées et d'autres demeurent inconnues, elles peuvent être nocives car elles sont jugées utiles dans certaines situations.

De multiples exemples sont présentés comme des perturbations de leur effet réel "perturbateur", on cite la divergence d'un actionneur par rapport à une référence donnée "référentiel". Les cas de "contributeurs" des perturbations peuvent être représentés au moyen d'une action qui vise à récupérer la fonction principale selon les caractéristiques recommandées dans une spécification du cas général.

Pour concrétiser ces principes développés dans notre approche, nous proposons ci-dessous plusieurs exemples de perturbations :

- Un ensemble d'équipements électriques ne respectant pas les limites de la compatibilité électromagnétique, génère des perturbations gênant le comportement souhaité de chacun d'eux ;
- Dans une chaîne de transmission mécanique, par exemple un engrenage, si les structures sont mal conçues, il se crée des vibrations qui sollicitent les composants mécaniques et, par la suite, développent des perturbations gérables.
- Dans le diagnostic de l'état réel de certains équipements (tubes, machines tournantes ...), nous ferons référence à des techniques de contrôle non destructif visant à introduire des perturbations (vibrations) afin de lever des signaux porteurs de la fonction utile des perturbations.
- Dans un système de suspension, l'introduction d'un amortisseur est utile pour réduire les perturbations apériodiques consécutives à une excitation.

Pour mieux gérer les différentes situations rencontrées, nous avons introduit notre concept original, détaillé dans les définitions de base suivantes :

1. La perturbation est liée à une tâche ;
2. La perturbation est mesurée par rapport à :
 - Références fonctionnelles (F R) ;

- Références de performance (P R).
3. Pour une tâche donnée, l'aspect physique peut être :

- Un phénomène Perturbant (D Ph) ;
- Un phénomène de contribution (C Ph).

Cette recherche vise à adopter un outil de modélisation pour les systèmes complets, y compris les perturbations. Nous avons introduit un nouveau concept permettant de diagnostiquer l'influence des perturbations et leurs effets sur les systèmes mécaniques.

Une étude de cas pour simplifier l'approche retenue est présentée dans l'annexe 4.

Conclusion

Les résultats de recherches bibliographiques sont associés avec ceux du recensement pratique avec les responsables dans le domaine pour délimiter les principales exigences en vue de concevoir une approche générique pour la modélisation des stratégies de maintenance des systèmes complexes.

La première partie présente l'approche globale de modélisation. Ensuite le détail est associé pour chaque étape de construction du modèle. Les limitations déduites de la recherche bibliographique sont alors prises en considération.

Une méthodologie pour classer et diagnostiquer les perturbations dans les systèmes mécaniques a été présentée dans ce chapitre. L'utilisation de la modélisation BG a été discutée pour surmonter la complexité et les simplifications excessives trouvées dans la modélisation des systèmes multi-énergies. Un système a été présenté pour illustrer l'intérêt de la méthode dans le diagnostic d'un système complexe, puis pour conserver la bonne variable afin de maintenir l'équipement avec la stratégie appropriée. Notre concept a été conçu dans le but d'études plus générales en relation avec l'optimisation de la conception de systèmes industriels complexes.

CHAPITRE V : EXPERIMENTATION DE L'APPROCHE D'EVALUATION DES STRATEGIES DE MAINTENANCE : CAS DES CENTRALES THERMIQUES

Introduction

Dans cette dernière partie du rapport, nous illustrons le cas d'étude d'une centrale thermique de production de l'électricité. Nous allons d'abord présenter le principe de fonctionnement, puis une démarche de collecte de données en respectant le modèle proposé est suivie. A la fin nous expliquons l'applicabilité de notre approche dans la modélisation des stratégies de maintenance des systèmes complexes.

1. Processus de production à la Centrale thermique

1.1. Principe de fonctionnement

La production de l'énergie électrique dans la Centrale thermique se passe par une succession d'étapes de transformation de la forme d'énergie, allant de celle chimique, calorifique, mécanique et finalement électrique.

En effet, grâce à la réaction exothermique du combustible, au sein de la chaudière, l'énergie chimique se transforme en énergie calorifique ; cette dernière est récupérée par l'eau pour se transformer en vapeur. Ayant atteint une température de 535 °C environ et une pression de 90 Bar, la vapeur est utilisée pour faire tourner une turbine à 3000 tr/min ; ce qui engendre une énergie mécanique donnant un mouvement de rotation pour l'alternateur. Ainsi l'alternateur convertit cette énergie mécanique en énergie électrique avec une tension de 10,5 KV, un transformateur élévateur permet d'adapter cette tension à celle du réseau de transport national qui est de 225 KV.

1.2. Description des processus principaux de la Centrale

❑ *Manutention charbon*

Le système de manutention du charbon permet de véhiculer le charbon, à partir de deux parcs, vers les trémies à charbon brut. La station de livraison de charbon est équipée de cinq trémies de réception dont trois d'une capacité de 45 t sont destinées pour la réception du charbon vapeur (CV). Les deux autres trémies ont une capacité de 45t et 75t, et sont réservées pour la réception du charbon vapeur. Le système de manutention se décompose de deux convoyeurs servant pour le transport du charbon vapeur CV, vers les chaînes de broyage.

❑ *Chaînes de broyage*

Le rôle des chaînes de broyage consiste à transformer le charbon de l'état brut à l'état pulvérisé, tout en éliminant autant que possible son humidité et en assurant une finesse optimale pour une meilleure combustion dans la chaudière.

❑ Chaudière

La chaudière est le premier transformateur d'énergie qu'on trouve dans une centrale thermique. Elle transforme l'énergie chimique contenue dans le combustible en énergie calorifique par la combustion. On l'appelle aussi générateur de vapeur. La chaudière de la centrale possède les caractéristiques suivantes :

- Elle est munie d'un ballon qui alimente la chaudière en eau d'une façon continue. Elle est à circulation naturelle par différence de pression. Elle débite 230 t/h de vapeur à une pression de 90 bars et à une température de 535°C.
- Elle est équipée de six brûleurs à charbon pulvérisé qui assurent le mélange intime du combustible et de l'air de combustion. Les gaz de la combustion sont aspirés par deux ventilateurs de tirage, Ces gaz parcourent un carneau où sont disposés de différents échangeurs de chaleur tels que les surchauffeurs, les économiseurs et les réchauffeurs d'air.

Les fumées de combustion sont dépoussiérées grâce à des filtres et sont évacuées par des cheminées.

❑ Turbine

La turbine est un moteur thermique où se transforme l'énergie thermique en énergie mécanique pour entraîner le rotor de l'alternateur. A l'entrée, elle est alimentée par une vapeur via un collecteur HP (Haute pression). La pression de cette vapeur atteint 90 Bars et sa température est d'environ 535°C.

❑ Recyclage

À la sortie de la turbine, la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance des réfrigérants à tirage forcé. L'eau ainsi obtenue est récupérée et refoulée dans la chaudière pour recommencer un autre cycle. L'eau utilisée pour le refroidissement est restituée à son milieu naturel ou renvoyée dans le condenseur.

❑ Alternateur

Cet alternateur est d'une puissance de 55 MW, d'une fréquence de 50Hz et sa vitesse de rotation est de 3000tr/min. Son excitation se fait par l'intermédiaire d'une excitatrice entraînée par le même arbre. Son refroidissement se fait par l'hydrogène. Un transformateur permet l'élévation de la tension produite par cet alternateur de 10,5 KV à 225 KV.

❑ Évacuation d'énergie

La centrale thermique est reliée au réseau électrique d'interconnexion par l'intermédiaire de deux lignes 225 KV. Ces deux lignes permettent l'évacuation de l'énergie produite vers le réseau national.

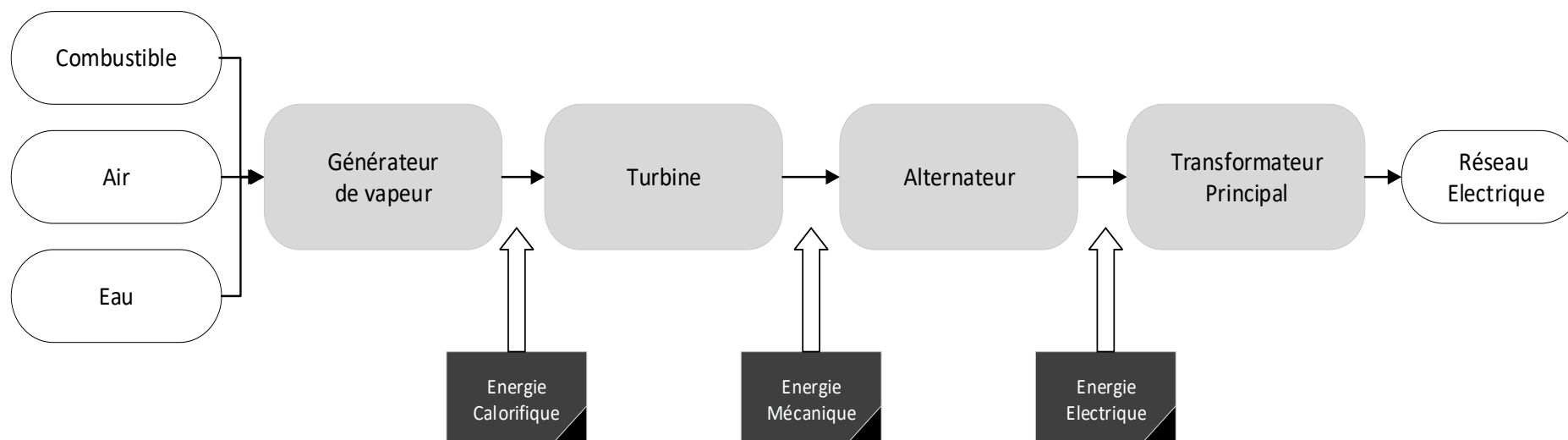


Figure 52: Schéma de principe de production de l'électricité dans une Centrale Thermique

La figure 52 montre le découpage en processus des différentes installations permettant la production de l'électricité dans une centrale thermique. Commenant par le processus eau qui consiste en l'alimentation en eau à l'usine qui devra être traitée dans un procédé de déminéralisation avant qu'elle soit acheminée vers le générateur de la vapeur ou la chaudière.

Le processus combustible contient de la matière première constituant le charbon et le fuel lourd permettant d'assurer la combustion pour chauffer l'eau déminéralisée circulant dans les circuits des tuyaux de la chaudière pour produire de la vapeur sèche qui fait tourner la turbine à vapeur.

Le processus vapeur constitue la partie de broyage du charbon brute qui sera transformé en charbon pulvérisé prêt à être transmis dans la chaudière à travers les brûleurs à charbon pour qu'il soit enflammé et donne lieu à une énergie calorifique qui augmentera la température permettant de chauffer de l'eau circulant dans les circuits de tuyaux des tubes écrans de la chaudière. De sous processus sont énumérés pour distinguer le sort des gaz et rejets issus de la combustion du charbon vapeur.

Le processus rejets rassemble les rejets liquides et solides qui vont être traités et récupéré après décantation dans une station de récupération des eaux du barrage à cendre permettant d'optimiser la consommation de l'eau en cycle fermé.

Le processus KWh est la dernière étape de transformation qui permettra de générer de l'électricité à travers l'alternateur entraîné par la force motrice de la turbine à vapeur. Cette énergie électrique sera évacuée dans le réseau national par le biais d'un transformateur élévateur de tension 225 KV. Des sous processus sont ainsi énumérés pour contenir la partie de refroidissement de l'eau à travers des ventilateurs à tirage forcée permettant de stabiliser le niveau du vide dans le condenseur de la turbine, le sous processus poste d'eau est dédiée au traitement qui sera effectuée pour appoint de l'eau déminéralisée dans le circuit.

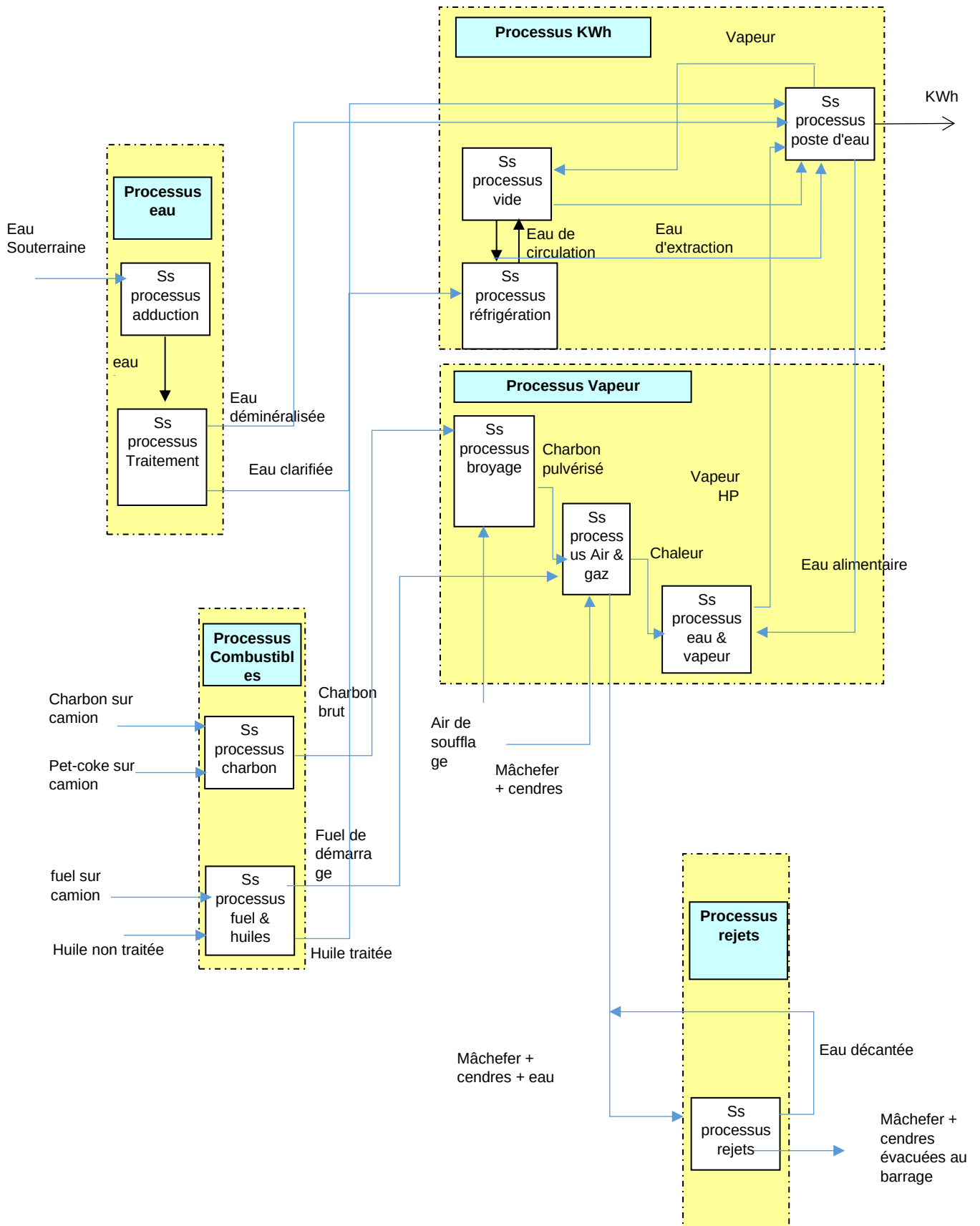


Figure 53: Processus de production dans la Centrale

2. Élaboration de l'historique des anomalies

Suite aux anomalies constatées, des actions de la maintenance corrective ont été mises en place, le service Contrôle Qualité enregistre la cause d'indisponibilité et la valeur des MWh non produite équivalente. Dans notre démarche nous sommes basés sur ces anomalies causant que ce soit des indisponibilités fortuites (arrêt de l'unité), ou des indisponibilités partielles (limitation de la charge de production).

2.1. Description du contenu du bilan

Tableau 13: Modèle du bilan des événements enregistrés

Indisponibilités Fortuites			Indisponibilités Partielles		
Anomalie	Énergie non produite (MWh)	% d'indisponibilité	Anomalie	Énergie non produite (MWh)	% d'indisponibilité
Fuite tubes écrans	11935		Vide bas	4291	
Purge collecteur HP indisponible	4234		Pompe de circulation indisponible	856	
Manque d'eau	2200		Ventilateur de broyeur 1A indispon.	590	
2 Pompes de circulation indisponibles	1046		Larmier bouché	245	

Le tableau 12 montre notre base de départ pour élaborer l'historique des interventions remarquables sur les équipements de la centrale, ceci aura pour objectif de recenser les équipements qui pénalisent la disponibilité de la centrale et bien sur des MWh non produites, par la suite ces équipements seront jugés stratégiques.

Après avoir complété l'ensemble des données d'entrées de chacune des trois unités, nous avons élaboré un autre bilan qui a pour objectif de ne garder que les anomalies uniques en faisant une somme des MWh non produite de la même anomalie. Le tableau 13 montre un extrait de ces résultats :

Tableau 14: Modèle de base du bilan des indisponibilités

Bilan Anomalies	Énergie non produite (MWh)		Anomalies uniques	Énergie non produite (MWh)
2 Pompes alimentaires indisponibles			2 Pompes alimentaires indisponibles	
Fuites Tubes écrans			Mauvais vide	
Vide bas			Fuites Tubes écrans	
Mauvais vide			Présence chlorure	
Présence chlorure			Fuites RHP	
Fuite vanne d'injection 218			Fuite vanne d'injection 218	
Fuites RHP			Fuites Surchauffeurs	
Fuites Surchauffeurs			Distributeur indisponible	
Fuites RHP			Extinction flamme	
Distributeur indisponible			Panneaux chaudière	
Extinction flamme				
Panneaux chaudière				

Les anomalies uniques enregistrées se limitent en 10, tandis que les anomalies causant des indisponibilités (fortuites + partielles) sont au nombre de 12.

2.2. Bilan des indisponibilités de l'unité n°1

Le tableau 14 illustre un extrait du bilan de l'historique des indisponibilités enregistrées pendant la période du 2001 à 2013.

Une fois ce bilan est établi, et pour fin de suivre l'évolution des anomalies et les statistiques élaborés pour chaque équipement en question, nous avons procédé à une analyse pointue pour affecter ces anomalies aux équipements correspondants en se basant sur les schémas des installations ainsi sur le retour d'expérience du personnel du service contrôle qualité.

Cette étape avait pour but principale d'élaborer un filtrage des anomalies par équipement et se permettre au service méthodes de classer les équipements qui pénalisent la centrale en termes de disponibilité.

Tableau 15: Extrait du bilan des anomalies de l'unité 1 de production

Bilan de la l'unité n° 01				
Année	Anomalies uniques	Énergie non produite (MWh)	% d'indispo/année	% d'idispo/productivité TR
2001	Fuites Surchauffeurs	59850	53%	14%
	Bouchage Carneau	34066	30%	8%
	Percement Condenseur	5170	5%	1%
	Fuites Tubes Écrans	5101	5%	1%
	Larmier Bouché	4071	4%	1%
	Câble grillés	2090	2%	0%
	Pompe de circulation 1A indispo.	522	0%	0%
	Fuites RHP	259	0%	0%
	Ventilateur broy. 1B indispo.	199	0%	0%
	TOTAL	137373		31%

Le tableau 15 montre un extrait de cette affectation pour les années 2001 et 2002 de la première unité.

Cette affectation nous a permis d'élaborer une application sous Excel qui donne directement l'évolution et les dates des indisponibilités dans l'équipement concerné (parmi les fonctions clés de la réussite d'une Gestion assistée par Ordinateur).

Tableau 16: Extrait de l'affectation des équipements concernés par les anomalies de l'unité n°01

Bilan de l'unité n° 01					
Année	Anomalies uniques	MWh	% d'indispo/année	% d'indispo/productibilité TR	Équipements
2001	Fuites Surchauffeurs	59850	53%	14%	Surchauffeurs à Convection
	Encrassement des RAT	34066	30%	8%	RAT
	Percement Condenseur	5170	5%	1%	Condenseur
	Fuites Tubes Écrans	5101	5%	1%	Tubes Écrans
	Larmier Bouché	4071	4%	1%	Larmier
	Câbles grillés	2090	2%	0%	Câbles
	Pompe de circulation 1A indispo	522	0%	0%	Pompes de circulation
	Fuites RHP	259	0%	0%	RHP
	Ventil broyeur 1B indispo	199	0%	0%	Chaîne de Broyage
	TOTAL	112593		26%	

Les figures 54 et 55 présentent cette évolution pour le cas des surchauffeurs à rayonnement de la première unité.

Équipements	Surchauffeurs à Rayonnement	
Étiquettes de lignes	Somme de Manque à gagner (MWh)	Somme de % d'indispo/ productibilité TR
2006	73975	16,89%
2007	50922,544	11,63%
2008	100079,2	22,85%
2009	37082,96	8,47%
2010	53182	12,14%
2013	46750	10,67%
Total général	361991,704	82,65%

Figure 54: Évolution des anomalies par équipement

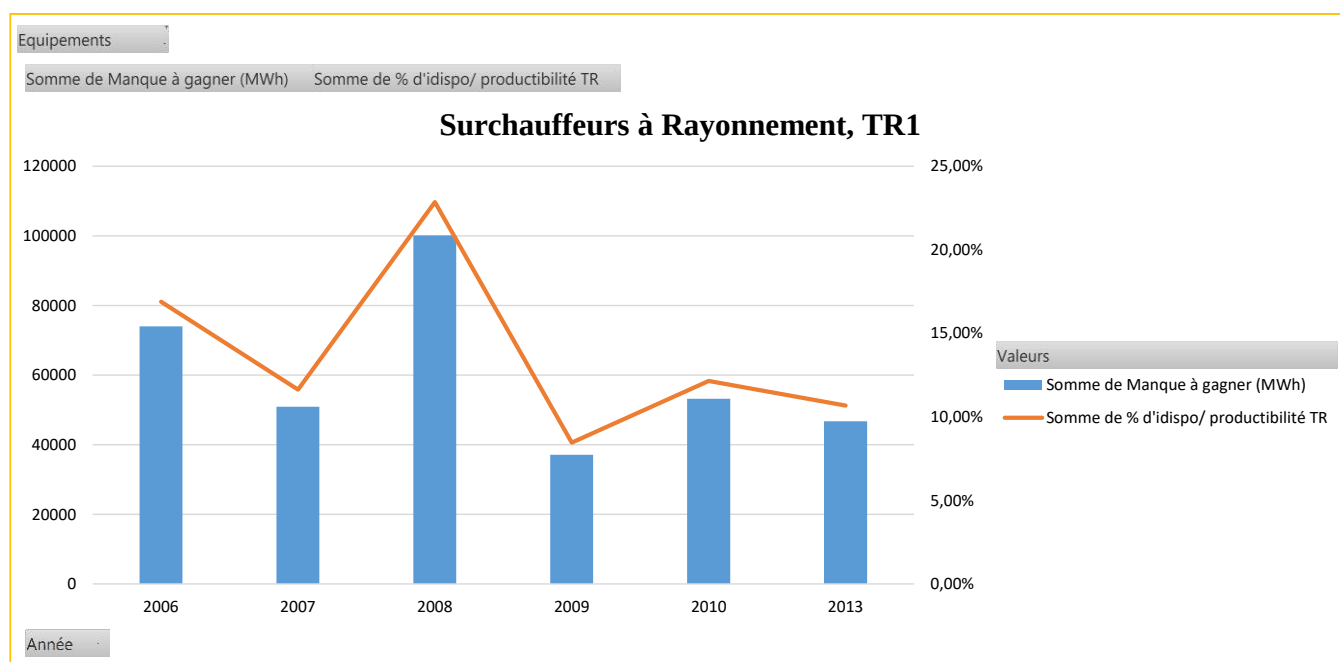


Figure 55: Évolution des anomalies des surchauffeurs à rayonnement de l'unité n° 01

2.3. Bilan des équipements causant des indisponibilités

Partant du principe que l'indisponibilité de la production à la centrale est causée par la défaillance d'au moins un équipement non redondant dans le processus de production ; pendant la période étudiée, nous avons classé les équipements qui causent plus de MWh non produite, ceci nous permettra par la suite d'avoir une idée sur le rendement de ces derniers.

Le tableau 16 résume ces statistiques pour la première unité

Tableau 17: Extrait du cumul de l'énergie non produite par équipement de l'unité n° 01

Équipement	Cumul Manque à gagner (MWh)	%	% cumulé
Surchauffeurs à Rayonnement	361992	27%	27%
Surchauffeurs à Convection	215254	16%	44%
Turbine	205363	16%	59%
Circuit de Vide	198276	15%	74%
Tubes Écrans	84685	6%	81%
Pompes Alimentaires	42475	3%	84%

3. Suivi des Écarts de la Consommation Spécifique Nette

3.1. Intérêts du calcul des Écarts

Le calcul de la consommation spécifique est un moyen de base qui nous permet de savoir à quel prix de combustible revient le KWh fourni par nos installations. Ceci nous permettra d'avoir une idée sur le rendement des installations en cas de leurs disponibilités. Pour cela il y a plusieurs méthodes de calcul à savoir :

- La méthode directe ;
- La méthode à partir des écarts ;
- La méthode indirecte.

3.2. Bilan des Écarts

L'analyse de l'historique des indisponibilités ne suffit pas de recenser les équipements stratégiques par la simple raison du fait qu'un équipement peut être disponible mais avec un mauvais rendement.

Pour consolider cette analyse nous avons élaboré depuis 2001, le bilan des écarts de la consommation spécifique nette qui se traduisent par une surconsommation du charbon le long du processus de production du KWh.

L'analyse des écarts de la consommation spécifique permet de déterminer les pertes qui peuvent être de différent type qui sont :

- **Écarts Externes A L'exploitation**
 - Écart dû au programme de charge :
 - Charge de l'unité ;
 - Facteur de puissance.
 - Écart dû à des causes atmosphériques :
 - Température eau de circulation ;
 - Écart dû aux caractéristiques du combustible :
 - Influence de la teneur en H₂ sur rendement chaudière ;
 - Influence du PCI sur le rendement de la chaudière.
- **Écarts Internes**
 - Écart dû aux pertes eau et vapeur ;
 - Écart dû à la surconsommation des auxiliaires électriques ;
 - Écart consommation électrique des arrêts pour avaries ;
 - Écart démarrage après arrêt programmé ;

- Écart démarrage fortuit ;
- Écart dû aux pertes par chaleur sensible ;
- Écart limitation de charge.

Le tableau 17 illustre ces écarts de la CSN après la dernière révision générale par ordre décroissant.

Tableau 18: Écarts de la CSN après la dernière révision générale

Classement des Écarts de la CSN après la dernière révision générale jusqu'au fin 2013					
Unité 1	Moyenne des Écarts	Unité 2	Moyenne des Écarts	Unité 3	Moyenne des Écarts
Vide condenseur	190	Vide condenseur	185	Vide condenseur	196
Avarie R H P	121	Consommation auxiliaires électriques	72	Consommation auxiliaires électriques	66
Consommation auxiliaires électriques	108	Pertes eau et vapeur	61	T° eau d'alimentation	63
Pertes eau et vapeur	56	Avarie R H P	60	Pertes eau et vapeur	57
Indisponibilité limitant la charge	48	T° eau d'alimentation	22	Indisponibilité limitant la charge	28
Température vapeur admission	22	Température vapeur admission	19	Avarie R H P	25
Influence P C I sur rendement	19	Indisponibilité limitant la charge	18	Température vapeur admission	19
T° eau d'alimentation	19	Influence P C I sur rendement	16	Influence P C I sur rendement	18
Démarrage après arrêt pour avarie ou travaux	7	Démarrage après arrêt pour avarie ou travaux	5	Démarrage après arrêt pour avarie ou travaux	5
Fioul de soutien	5	Fioul de soutien	4	Fioul de soutien	3
Cons électriques pendant arrêt pour avarie	0	Pression vapeur admission	2	Température eau de circulation	0
Pression vapeur admission	-1	Cons électriques pendant arrêt pour avarie	1	Pression vapeur admission	0
Température eau de circulation	-4	Température eau de circulation	-6	Cons électriques pendant arrêt pour avarie	0
Pertes chaleur sensible chaudière	-5	Pertes chaleur sensible chaudière	-29	Pertes chaleur sensible chaudière	-6

4. Équipements stratégiques

4.1. Équipements stratégiques par rapport à l'historique des indisponibilités

Sur la base du classement des installations les plus pénalisants causant des indisponibilités fortuites et des limitations de charge selon l'historique qui date depuis 2001, nous avons enregistré les statistiques suivantes :

N° de l'unité	U1	U2	U3
Nombre d'équipements	41	48	47

Nous avons ainsi procédé à une classification Pareto de ces équipements pour cerner les équipements causant le 80 % de ces indisponibilités, tout calcul fait, nous avons retenu les équipements suivants :

Tableau 19: Équipements les plus pénalisants la disponibilité de l'unité n°1

Unité 1	Unité 2	Unité 3
Surchauffeurs à Rayonnement	Collecteur HP	Circuit de Vide
Surchauffeurs à Convection	Circuit de vide	Surchauffeurs à Rayonnement
Turbine	Surchauffeurs à convection	Surchauffeurs à convection
Circuit de Vide	Tubes Écrans	Condenseur
Tubes Écrans	Surchauffeurs à Rayonnement	Tubes Écrans
	Turbine	Économiseur
	Réchauffeur HP	Réchauffeur d'Air Tubulaire

Après avoir recensé ces équipements, nous avons démarré une étude de l'historique des anomalies et les grands travaux effectués, ceci pour fin de se débarrasser de toute cause spéciale qui aura pour conséquence de fausser les analyses en question tel que les incidents d'exploitation qui sont imprévisibles dans les cas où la probabilité du non détection est importante. Le tableau 19 illustre un exemple de l'historique de ces équipements extraits des dossiers appareils selon la mise à jour disponible ainsi d'après des séries d'entretiens avec les préparateurs responsables.

Tableau 20: Historique des grandes actions sur les équipements pénalisants de l'unité n°01

Équipement	Historique
Surchauffeurs à Rayonnement	1997 : Remplacement à 100 % (grande révision) 2009 : Remplacement à 100 % (grande révision)
Surchauffeurs à Convection	2002 : Remplacement à 100 %
Turbine	2009 : Révision générale du GTA N°1
Circuit de Vide	2009 : Retubage de 4624 tubes/ 7700 du Condenseur 2009 : Remplacement des buses de l'éjecteur 2010 : Remplacement des vannes de purges. 2009 : Remplacement des VTF et moteurs. Élimination des entrées d'air lors des visites systématiques
Tubes Écrans	2009 : Remplacement de la partie inférieure y compris la partie salée

4.2. Équipements Stratégiques par rapport à l'analyse de prévision des risques

Étant donné que la centrale dispose de plusieurs équipements qui nécessitent un niveau de maintenance plus élevé que celui des compétences du personnel d'exploitation, ceci impose le recours aux professionnels dans le domaine de la maintenance à haut niveau, surtout en ce qui concerne celui de la maintenance préventive des révisions générales.

Dans cette optique, nous avons construit une équipe pour fin du recenser les équipements stratégiques tout en adoptant une démarche de prévision de risque couronné par le retour d'expérience de chacun des membres de l'équipe qui regroupe le chef de la division technique, les chefs du service Méthodes et Contrôle qualité aussi bien que les préparateurs du bureau de méthodes.

Les règles de choix des équipements stratégiques ont été fondées sur plusieurs critères qui sont :

- La manifestation de la défaillance d'un équipement sur la marche de la centrale ;
- La sécurité du personnel et des biens ;
- Le coût d'achat de l'équipement (en cas de défaillance) ;
- L'existence de la technologie utilisée dans le marché.
- La durée d'indisponibilité en cas de défaillance (la durée la plus pessimiste) ;
- La redondance de l'équipement dans le processus de production ;
- La possibilité de détection du la défaillance avant son apparition.

La liste suivante détaille en trois catégories les équipements dont la défaillance peut résulte :

- L'arrêt total de la centrale ;
- Arrêt fortuit d'une seule unité ;
- La limitation de la charge d'une unité.

Tableau 21: Scénarios des différentes anomalies des équipements sur la marche de la Centrale

Manifestation de la défaillance d'un équipement sur la marche de la Centrale		
Arrêt de la Centrale	Arrêt d'une unité	Limitation de la Charge
- Défaillance Poste Mâchefer - Défaillance Poste Fuel - Défaillance Poste ED - Défaillance Manutention Charbon - Défaillance Chaudière de démarrage - Défaillance Turbosoufflante - Contamination des 500 m³ - Niveau Château d'eau très Bas - Fuite importante dans la conduite d'eau de circulation - Défaillance d'alimentation en Hydrogène - Défaillance Compresseurs 40 Bars	- 2 chaines de Broyages indisponibles - 2 ventilateurs de tirages indisponibles - 2 ventilateurs de soufflage indisponibles - Chaudière percée - Défaillance mécanique des vannes d'alimentation d'eau - Défaut de régulation d'eau d'alimentation - Survitesse turbine 3300 tr/min et 3360 tr/min - Niveau château d'eau Bas - 2 pompes Alimentaires indisponibles - Dilatation différentielle turbine anormale - Température haute paliers turbine - Vibration haute paliers turbine - Chute de Vide < - 470 mm Hg - Pression graissage turbine Basse à 0,3 Bar - Pression Basse d'huile de régulation turbine - Déplacement axial turbine inadmissible - Défaillance dans le Transformateur principal - Défaut Disjoncteur - Manque d'étanchéité de l'Hydrogène dans l'alternateur - Perte d'excitation - Défaut Alternateur - 2 pompes d'extractions indisponibles - 2 pompes de circulation indisponibles	- 1 chaine de Broyage indisponible - 1 ventilateur de tirage indisponible - 1 ventilateur de soufflage - Bouchage d'un distributeur à CP - Bouchage de larmier - Indisponibilité des ventilateurs de Tirage Forcé - Percement d'un RBP - Percement d'un RHP - Problème de déplacement axial turbine - Chute de pression Hydrogène au niveau de l'alternateur - Chute de vide < - 570 mm Hg - 2 pompes de purges indisponibles - 1 pompe de circulation indisponible

D'après la liste qui regroupe les équipements causant des indisponibilités importantes à la centrale, nous remarquons l'inexistence de plusieurs équipements.

Sur la base des critères de sélection déjà cités nous avons retenu les équipements suivants :

Tableau 22: synthèse des équipements stratégiques

Équipements stratégiques de la Centrale Thermique		
	Résultats de l'historique	Résultats du retour d'expérience
Côté Chaufferie	- Surchauffeurs à rayonnement ; - Surchauffeurs à convection ; - Tubes écrans ; - Réchauffeurs d'air à tubulaire ; - Économiseurs ; - Larmier ; - Bruleurs.	- Circuit d'injection en I et en U ; - Ballon.
Côté salle machine	- Turbine ; - Réchauffeurs à Haute Pression ; - Pompes alimentaires ; - Circuit de vide ; - Condenseur.	- Vanne d'arrêt ; - Alternateur ; - Transformateur.
Circuits Communs	- Conduite de la grande circulation ; - Conduite d'adduction d'eau.	- Circuit de réfrigération forcée

5. Synthèse des résultats d'analyses aux équipements stratégiques

Pour chaque équipement stratégique, nous avons ainsi construit un tableau de bord qui détaille :

15. La dernière action réalisée ;

16. Les derniers contrôles ;

17. Les éventuels contrôles (CND, CD...) et leurs résultats.

Les tableaux 22 et 23 montrent l'exemple de synthèse des actions réalisées et à planifier pour les surchauffeurs à rayonnement, chaque unité est détaillée séparément :

Tableau 23: synthèse des actions réalisées et à planifier sur les surchauffeurs à rayonnement

Surchauffeurs à Rayonnement	Synthèse des actions réalisées		
	Unité 1	Unité 2	Unité 3
Dernière Action	Remplacement à 100 % en 2009	Remplacement à 100 % en 2011	Remplacement à 100 % en 2010
Dernier Contrôle	17/01/2014	2011	26/09/2013
Résultats	Les paquets 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12 présentent des structures décarburées	Aucune analyse après le dernier remplacement	Les paquets 8 et 11 présentent des structures décarburées et présence des dépôts
État Actuel	Fréquence des percements élevée	Des fréquences mini par rapport aux autres unités	Fréquence des percements élevée
	Voir Historique des anomalies	Voir Historique des anomalies	Voir Historique des anomalies

Tableau 24: synthèse des actions réalisées et à planifier sur le circuit de vide

Circuit de Vide	Synthèse des actions réalisées		
	Unité 1	Unité 2	Unité 3
Dernière Action	2009 : remplacement de 4624/7700 des tubes condenseur	2011 : remplacement de 4828/7700 des tubes condenseur	2010 : remplacement de 4972/7700 des tubes condenseur
Dernier contrôle	2014	2014	2014
Résultats	Mauvais rendement du circuit	Mauvais rendement du circuit	Mauvais rendement du circuit
	Dégradation remarquable dans les éléments	Dégradation remarquable dans les éléments	Dégradation remarquable dans les éléments
	Voir QC Story N°1 pour les analyses et propositions		

Nous avons généralisé la même démarche pour les autres équipements stratégiques.

Nous illustrons ci-dessous les données que nous avons pu récupérer concernant le MTBF et par conséquent le taux de défaillance des unités de la Centrale :

Tableau 25: statistiques relatives à la fiabilité des unités de production

Année	Unité 1				Unité 2				Unité 3				Centrale
	Heures de marche	Nbre de démarrages	Taux de défaillance	MTBF	Heures de marche	Nbre de démarrages	Taux de défaillance	MTBF	Heures de marche	Nbre de démarrages	Taux de défaillance	MTBF	Moyenne Taux de défaillance
2002	6909	12	0,0017	576	6482	17	0,0026226	381	5140	16	0,0031	321	0,0025
2003	6484	14	0,0022	463	5703	12	0,0021042	475	7446	14	0,0019	532	0,0020
2004	7744	10	0,0013	774	7378	13	0,001762	568	7632	13	0,0017	587	0,0016
2005	7135	18	0,0025	396	7785	14	0,0017983	556	8141	8	0,0010	1018	0,0018
2006	6312	27	0,0043	234	7248	21	0,0028974	345	6719	17	0,0025	395	0,0032
2007	6962	20	0,0029	348	7210	17	0,0023578	424	6913	24	0,0035	288	0,0029
2008	5886	28	0,0048	210	7326	24	0,003276	305	7941	12	0,0015	662	0,0032
2009	2757	21	0,0076	131	7999	16	0,0020003	500	5983	18	0,0030	332	0,0042
2010	7361	23	0,0031	320	7190	22	0,0030598	327	4278	11	0,0026	389	0,0029
2011	8061	7	0,0009	1152	4393	8	0,0018211	549	7885	11	0,0014	717	0,0014
2012	6488	15	0,0023	433	7632	9	0,0011792	848	7579	18	0,0024	421	0,0020
2013	6494	27	0,0042	241	7016	19	0,0027081	369	7594	11	0,0014	690	0,0028

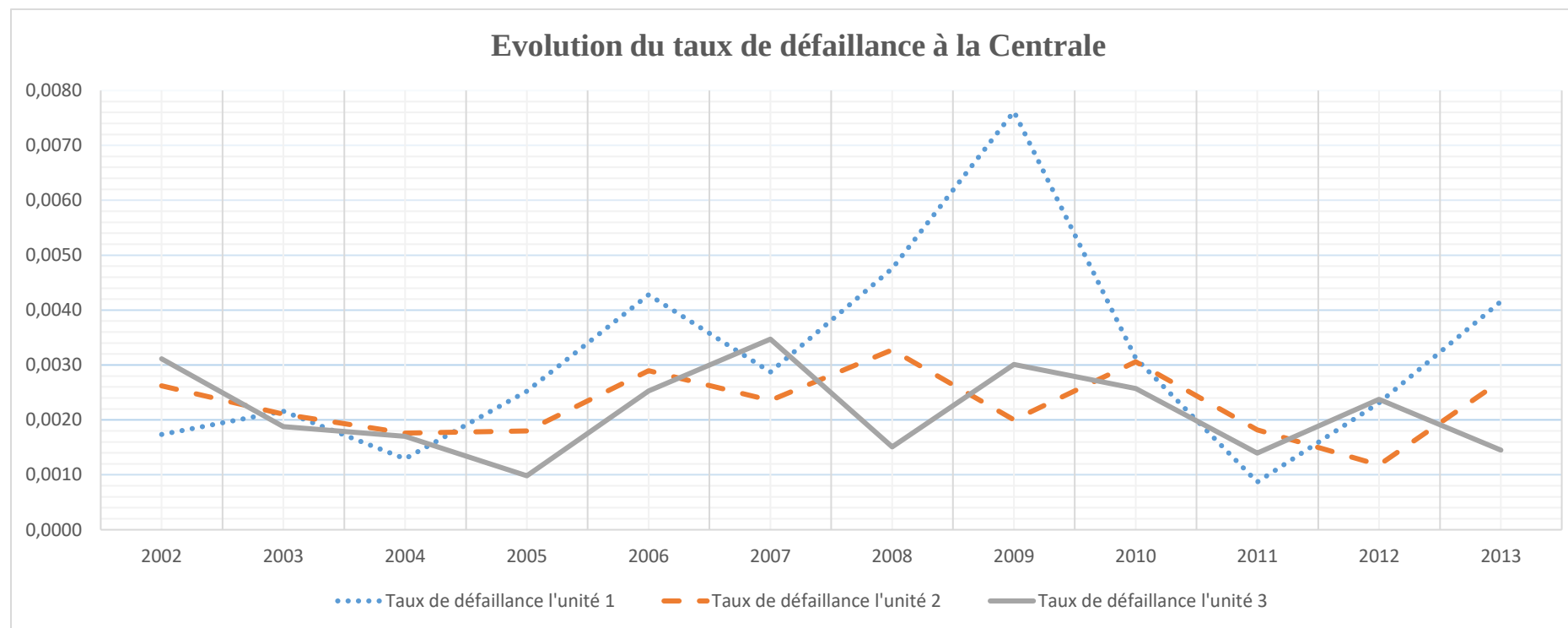


Figure 56: Évolution du taux de défaillance à la centrale

La figure 56 résume le taux de défaillance calculé sur la période d'étude. Elle montre le niveau de maîtrise de la maintenance des installations en évitant les indisponibilités fortuites. Après la période allant du 2009 au 2011 dont des périodes prolongées de maintenance ont été entretenues, nous constatons le taux de défaillance minimal pour les années qui suivent montrant l'efficacité des actions maintenances effectuées.

6. Évaluation des stratégies de maintenance

Après avoir étudié la partie modélisation selon l'approche retenue pour ce travail de recherche, le modèle retenu doit être simulé afin de sortir le meilleur mix des stratégies de maintenance possibles.

La simulation des différents cas de figure nécessite les données d'entrées des équipements retenus pour pouvoir lancer l'algorithme d'optimisation.

6.1. Paramétrage des données d'entrées du modèle

Nous avons précisé dans les étapes de modélisation que les variables de décision dans notre cas d'études sont les suivants :

18. Maximiser la production d'électricité

19. Minimiser la consommation Spécifique Nette « CSN » (meilleur rendement des équipements).

Nous sommes donc confrontés au cas d'optimisation multi-objective. Les scénarios qui en résultent doivent prendre en considération le volet production et également le rendement qui reflètent la bonne santé des équipements du processus de transformation de l'énergie calorifique en énergie électrique.

La fonction objective peut être exprimée en fonction de ces deux variables. La matérialisation se fera en utilisant le « manque à gagner » engendré par l'indisponibilité d'une unité de production, il est donc à minimiser. La variable de la CSN est à minimiser tout en évitant d'une part l'indisponibilité fortuite (intempestive) et partielle (limitation de charge). Cette variable est donc incluse en partie dans le premier facteur.

Nous allons retenir la fonction objective suivante :

$$\text{Coût global} = \sum \text{manque à gagner en MWh}(\text{arrêts et limitations non proramées}) \quad (5)$$

Les données d'entrées du modèle sont à exploiter dans différents niveaux, à savoir :

- Les documents constructeurs des équipements ;
- Les préconisations du constructeur de la centrale ;
- Les dossiers des consignes d'exploitation de la centrale ;
- Les règles de bonnes pratiques industrielles ;
- Les documents disponibles dans le bureau de méthodes ;
- Les conditions d'environnement et de limites réglementaires.

En plus des paramètres cités ci-dessous, la configuration des données d'entrées pour les différents équipements nécessite une maîtrise des données relatives aux états des équipements comme le montre le tableau 25 :

Tableau 26: paramétrage des données maintenance par équipement

Équipement	MTBF	Type de maintenance possibles	Consignes d'exploitation (limites)	Protections activées
Identification de l'équipement	Le moyen temps de bon fonctionnement	Selon les types disponibles	Les limites conditionnant le fonctionnement normal de l'équipement	Les protections qui causent les déclenchements de l'équipement

Pour les équipements dont on dispose des moyens de mesures on-line, ces mesures doivent être atteignables pour prédire l'évolution des niveaux de dégradation qui enclenchent les modes de défaillances concernées.

6.2. Paramètres relatifs à la maintenance

La fonction objective tient compte des variables de décisions correspondants. Ces variables sont relatives aux données nécessaires pour réaliser les actions de maintenance et les coûts engendrés. Ces derniers tiennent compte des charges directes et indirectes de la maintenance.

6.3. Autres données relatives à la sûreté de fonctionnement

L'objectif principale derrière la recherche d'une optimale stratégie de maintenance est de garantir au maximum la sûreté de fonctionnement des installations et ce dans de bonnes conditions. C'est pour ça qu'une analyse de sûreté de fonctionnement est primordiale avant la conception du modèle à simuler.

Comme nous avons déjà montré dans notre cas d'étude. Nous avons réparti trois types de scénarios qui décrivent la manifestation de la défaillance de quelques équipements sur la marche normale de la centrale, à savoir :

- Les équipements dont la défaillance entraîne l'arrêt d'une unité de production ;
- Les équipements dont la défaillance entraîne la limitation de production dans une unité de production ;
- Les équipements dont la défaillance entraîne l'arrêt totale de la centrale et rend une indisponibilité totale.

Conclusion

Dans cette dernière partie du travail, nous avons retenu le secteur de production de l'électricité au Maroc et spécialement celui généré à partir des centrales thermiques à vapeur vu l'aspect à la fois compliqué et complexe du processus de production et de maintenance. L'étude consiste à faire un bilan d'historique des enregistrements relatives aux anomalies enregistrés par les services maintenance pour pouvoir entamer une analyse approfondie qui pourra nous servir de base pour que le système maintenu pourra faire l'objet d'une étude d'optimisation des stratégies de maintenance adéquates.

L'exemple retenu a été détaillé, puis étudié suivant notre modèle ESMASYC, ce qui a permis d'extraire les installations névralgiques qui causent des pénalités lourdes en cas de défaillance prolongée. La suite du travail a été consacrée pour les stratégies de maintenance applicables et leurs seuils/raisons de déclenchement selon les opportunités disponibles et les ressources affectées. La recherche d'optimisation tiendra donc de tous ces paramètres pour pouvoir établir des itérations multiples pour retenir le mix optimal des stratégies à retenir pour atteindre au mieux les performances souhaitées du matériel maintenu.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Avec le progrès des systèmes industriels, qui sont devenus de plus en plus complexes, les outils classiques de la maintenance deviennent incapables de maîtriser le comportement dynamique et complexe afin d'adopter de bonnes stratégies de maintenance au système maintenu. Les outils et lois mathématiques traduisant les relations et paramètres dans le cas des systèmes complexes se trouvent limités pour traduire les non-linéarités issues du caractère imprévisible et la forte complexité des interactions entre les composantes des systèmes, d'où la nécessité de basculer vers des solutions alternatives qui minimisent les incertitudes et divergences constatées. La simulation est alors la solution la plus répondue par les chercheurs tenant compte des avantages offerts tels que la rapidité dans le calcul et la modélisation multi-objective des paramètres d'optimisation.

Notre motivation au titre du présent travail de recherche est de proposer une contribution dans le domaine qui permet de choisir les stratégies de maintenance optimales dans le contexte des systèmes industriels complexes. Notre proposition du modèle ESMASYC (Évaluation de stratégies de maintenance des systèmes complexes) est issue alors des opportunités de recherche dans la littérature auxquelles rajoutés les besoins exprimés sur le cas d'étude à travers l'audit de la fonction maintenance dans le domaine de la production d'électricité dans les centrales thermiques au Maroc.

La complexité dans les systèmes industriels a été expliquée dans le premier chapitre pour retenir l'aspect incertitude, désordre (chaos) et dynamique, contrairement aux systèmes dites compliqués ou simples qui sont relativement à caractère prévisible et linéaire. Des exemples de systèmes complexes ont été illustrés. La sûreté de fonctionnement a été abordée par les chercheurs et industriels pour minimiser les dégâts causés par les défaillances intempestives des systèmes industriels, dont l'histoire a marqué parfois des conséquences lourdes suite aux incidents survenus lors du fonctionnement des systèmes. L'avancée des technologies relatives, aujourd'hui, à l'ère de la quatrième révolution industrielle, également appelée industrie 4.0, a permis de posséder des instruments de mesures et de contrôles capables d'alerter à temps les exploitants pour éviter de reproduire des phénomènes du passé tout en intégrant des approches de l'intelligence Artificielle et du Machine Learning dans les processus de prévisions en question.

Nous avons parcouru, dans le deuxième chapitre, la littérature de recherche pour constituer l'état de l'art sur la modélisation et l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes complexes. Une étude préalable de plus de 200 papiers et manuels de maintenance a été traitée pour retenir ceux en relation avec la thématique de notre sujet de recherche. En plus des outils mathématiques, initialement proposés dans la littérature, des outils de simulation prennent la relève pour contenir les simplifications exagérées lors de la prise en compte des spécificités des systèmes complexes. Cette alternative a été confortée par le développement dans l'électronique embarquée et l'avancée remarquable des performances des processeurs dans le traitement des calculs de données en moins de temps et à moindre coût.

Parmi les défis des chercheurs est la prise en compte de l'aspect fortement dynamique des systèmes complexes ; la recherche d'optimisation multicritère des variables souvent antagonistes entre la production et la maintenance (exemple de disponibilité et de fiabilité) ; la difficulté de maîtriser les incertitudes intrinsèques et l'apparition des phénomènes des défaillances cachées qui causent des arrêts prolongés de fonctionnement.

Nous nous sommes concentrés dans le troisième chapitre au cas d'étude dans le domaine de la production de l'énergie électrique, et ce à travers le recours au formalisme des deux organismes pionniers dans le domaine, à savoir ADEPA et CETIM. Le questionnaire entretenu avec les dirigeants et pratiquant des centrales de production vise à extraire leurs besoins explicites lors des entretiens effectués. Ce questionnaire est reparti sur 8 axes principaux de la fonction maintenance. Le livrable de cette partie a permis donc d'enrichir les résultats de l'état de l'art pour pouvoir formaliser un cadre global décrivant les enjeux majeurs pour l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes complexes.

La formalisation de notre approche ESMASYC a été présentée dans le quatrième chapitre tout en mentionnant les étapes de modélisation via une présentation sous forme d'ordinogramme standard, afin de faciliter sa compréhension par le lecteur. Ce modèle a été proposé en se basant sur les exigences retenus et regroupés dans les parties précédentes. Il vise à permettre aux utilisateurs une compréhension globale de leurs systèmes de maintenance tout en permettant une flexibilité de choisir entre plusieurs alternatives selon le cas d'étude approprié. Il est conçu de façon à permettre l'intégration dans les logiciels de simulation développé pour les recherches d'optimisation. Pour fin de considérer les incertitudes liées aux systèmes complexes, mais également des défaillances cachées, nous avons présenté une illustration d'une approche générique pour la classification des perturbations dans les systèmes mécaniques qui servira de base pour le diagnostic de l'état de santé des interactions dans les systèmes complexes. Cette approche a été concrétisée par l'outil Bond Graph, permettant la modélisation de systèmes multi-énergies ou

également dites mécatroniques au sens large du terme. Cet outil est utilisé alors pour rapprocher les interactions entre les différents éléments des systèmes complexes et également pour classifier les perturbations souhaitées avec ceux qui contribuent à la dégradation accélérée des équipements maintenus.

Nous avons ensuite abordé, dans le dernier chapitre, l'expérimentation de l'approche ESMASYC dans le cas des centrales thermiques de production de l'électricité au Maroc. Donc, après avoir présenté le principe de fonctionnement et les différentes parties, nous avons retenu une période d'étude d'un historique de 13 ans à compter de 2001. Cette étude consacrée initialement à une recherche approfondie des sources de faiblesses dans le processus de production qui nous a permis d'identifier les équipements pénalisants. Nous avons également constitué un groupe de travail qui a complété l'étude par le rajout des contraintes de criticité des équipements auxquels associés les conséquences d'arrêt partiel ou total en cas de leur (s) défaillance (s).

Toutefois, le cadre global de travail que nous cherchions à concrétiser par le présent sujet de recherche n'est pas encore achevé. Les axes suivants composent les perspectives qui constituent les futurs travaux de recherches d'amélioration.

Perspectives de recherches :

Nous avons essayé dans notre présent travail d'apporter une contribution dans le domaine de l'optimisation des stratégies de maintenance des systèmes complexes, et ce à travers le développement d'une approche pour la modélisation et la simulation de ces systèmes industriels. Mais comme tout travail de recherche, nous nous sommes toujours confrontés à des limitations qui constituent les opportunités de plus de recherche à allouer pour fiabiliser les modèles conçus. Nous citons ci-après quelques perspectives de recherches qui peuvent être envisagées :

1. Modélisation des stratégies de maintenance des machines intelligentes (Industrie 4.0). Nous pourrions alors explorer l'option de modélisation avec la simulation basée sur un agent, car les machines seront considérées comme des objets intelligents ;
2. Intégration des outils avancés du Machine Learning dans la prédiction de la durée de vie résiduelle des équipements ;
3. La généralisation du modèle à d'autres secteurs dont figure l'utilisation de systèmes complexes ;
4. La prise en compte des outils de l'E-maintenance pour prendre plus de flexibilité et la dynamique des systèmes ;

5. Le développement d'un cadre qui aide à décider quelle technique de modélisation sera la plus adaptée au problème en question. Ainsi, par exemple, de nombreuses techniques de modélisation sont proposées dans la littérature : Réseaux de Pétri, Chaînes de Markov, Monte Carlo, Simulation des événements Discrets ... etc. Pouvons-nous développer un cadre qui nous aide à choisir la bonne technique de modélisation lorsque nous voulons modéliser un système de maintenance ?

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] B. T. Dabbs, "The true cost of maintenance," no. April, 2004.
- [2] V. Zille, "Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants," 2009.
- [3] S. H. Sheu and C. T. Liou, "An age replacement policy with minimal repair and general random repair cost," *Microelectron. Reliab.*, vol. 32, no. 9, pp. 1283–1289, Sep. 1992.
- [4] T. W. Archibald and R. Dekker, "Modified block-replacement for multiple-component systems," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 45, no. 1, pp. 75–83, 1996.
- [5] O. Prakash, A. K. Samantaray, and R. Bhattacharyya, "Fault diagnosis and remaining useful life prediction of multiple deteriorating components in hybrid dynamical system," *Saf. Reliab. – Safe Soc. a Chang. World*, no. November, pp. 977–985, 2018.
- [6] Y. Zhao and S. Addepalli, "Remaining Useful Life Prediction using Deep Learning Approaches : A Review," no. July, 2020.
- [7] C. Rouillard, "Le Reengineering. Réinventer l'entreprise pour une amélioration spectaculaire de ses performances Michael Hammer et James Champy Paris: Dunod, 1993, 247 p.," *Can. J. Polit. Sci.*, vol. 28, no. 3, pp. 606–608, Sep. 1995.
- [8] Philippe Pajot, "La naissance d'une théorie au carrefour des disciplines | larecherche.fr," *août*, 2018. [Online]. Available: <https://www.larecherche.fr/la-naissance-dune-theorie-au-carrefour-des-disciplines>.
- [9] V. Pagani, J. Kivits, L. Minary, L. Cambon, F. Claudot, and F. Alla, "La complexité: concept et enjeux pour les interventions de santé publique," *Sante Publique (Paris)*, vol. 29, no. 1, p. 31, 2017.
- [10] E. Morin, *Introduction à la pensée complexe*. 2015.
- [11] J.-F. VAUTIER, "La notion d'interaction dans les approches systémiques pour appréhender la complexité" - Livre blanc | *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [12] G. S. R. Part, "Normes de sûreté de l'AIEA." AIEA.
- [13] S. E. Page, *Diversity and Complexity*. 2010.
- [14] "Home | Santa Fe Institute." [Online]. Available: <https://www.santafe.edu/>.
- [15] L. E. S. Focus, "LA NOTION DE CONFIGURATION DANS DES APPROCHES SYSTÉMIQUES POUR La notion de Dans des approches systémiques pour appréhender la complexité." 2018.
- [16] "Approche systémique- Wikipédia." [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Approche_systémique.
- [17] A. Yatchinovsky, *L'approche systémique: Pour gérer l'incertitude et la complexité*. 2018.
- [18] L. von Bertalanffy, *Théorie générale des systèmes*. 1993.
- [19] "Quelle différence entre complexe et compliqué ? | Facilitation graphique, video scribing et design de l'information." [Online]. Available: <https://www.simplixi.fr/difference-complexe-et-compliqué/>.
- [20] N. Boccara, "Modeling complex systems," vol. 41, no. SUPPL. 1, pp. 181–191, 2010.
- [21] M. Lamure, "Les systèmes de santé : systèmes complexes, Modélisation et Simulation." [Online]. Available:

www.sfes.info.

- [22] “Système Complexe.” [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_complexe.
- [23] G. Zwingelstein, “Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes - Principaux concepts,” vol. 33, no. 0, 2009.
- [24] A. Villemeur, “Sûreté de Fonctionnement des systèmes industrielles,” 1998. [Online]. Available: <https://www.eyrolles.com/Sciences/Livre/surete-de-fonctionnement-des-systemes-industriels-9782212016154/>.
- [25] “L’histoire du Groupe Apave, liée à celle du progrès | Apave.” [Online]. Available: <https://www.apave.com/a-propos/le-groupe/notre-histoire>.
- [26] “Accident nucléaire de Three Mile Island — Wikipédia.” [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Accident_nucléaire_de_Three_Mile_Island.
- [27] S. E. Cooper, a. M. (Nrc) Ramey-Smith, and J. Wreathall, “NUREG/CR-6350: A Technique for Human Error Analysis (ATHEANA),” 1996.
- [28] J. C. Williams, “Heart — A Proposed Method for Achieving High Reliability in Process Operation by Means of Human Factors Engineering Technology,” vol. 7353, no. April, pp. 4–25, 2016.
- [29] G. Zwingelstein, “Sûreté de fonctionnement - Principaux concepts Sûreté de fonctionnement Principaux concepts,” vol. 33, no. 0, 2019.
- [30] I. Tajri and A. Cherkaoui, “Modeling the complexity of the relationship (Lean , Company , Employee and Cognitive Ergonomics) Case of Moroccan SMEs,” no. October, 2015.
- [31] Mohamed Saad Bajjou ; Anas Chafi, “Lean construction implementation in the Moroccan construction industry Awareness , benefits and barriers,” 2018.
- [32] M. S. Bajjou and A. Cha, “Exploring Causes of Wastes in the Moroccan Construction Industry,” pp. 57–64, 2019.
- [33] G. Zwingelstein, “Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes - Analyse prévisionnelle et bases de données de fiabilité,” vol. 33, no. 0, 2009.
- [34] T. Toriizuka, “Application of performance shaping factor (PSF) for work improvement in industrial plant maintenance tasks,” vol. 28, pp. 225–236, 2001.
- [35] V. N. Aju and O. P. Gandhi, “Quantification of Human Error in Maintenance Using Graph Theory and Matrix Approach,” no. March, 2011.
- [36] S. M. Asadzadeh and A. Azadeh, “An integrated systemic model for optimization of condition-based maintenance with human error,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 124, pp. 117–131, 2014.
- [37] Driss Bouami, *Le grand Livre de la Maintenance*, no. 1. 2019.
- [38] G. Zwingelstein, “Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes,” vol. 41, no. 0, 1999.
- [39] G. Zwingelstein, “Analyse et bases de données de fiabilité Sûreté de fonctionnement Analyse et bases de données de fiabilité,” vol. 33, no. 0, 2019.
- [40] D. N. P. Murthy and K. A. H. Kobbacy, *Complex System Maintenance Handbook*. Springer, 2008.
- [41] M. Bevilacqua and M. Braglia, “The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 70, no. 1, pp. 71–83, Oct. 2000.

- [42] M. Gilvanejad, H. A. Abyaneh, and K. Mazlumi, "Fuse cutout allocation in radial distribution system considering the effect of hidden failures," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 575–582, Nov. 2012.
- [43] S. Vaidya, P. Ambad, and S. Bhosle, "Industry 4.0 – A Glimpse," *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 233–238, Jan. 2018.
- [44] "Les 4 révolutions industrielles : de la machine à vapeur au tout numérique," *Janvier*, 2017. [Online]. Available: <https://www.sentryo.net/fr/quand-revolutions-industrielles-amenent-industrie-4-0/>.
- [45] A. Turing and D. (Darrel) Ince, *Mechanical intelligence*. Cambridge University Press, 1992.
- [46] Larousse, "Encyclopédie Larousse en ligne - intelligence artificielle." 2018.
- [47] P. Institue, "Intelligence Artificielle en maintenance : prédire et prévenir," pp. 1–3, 2019.
- [48] A. Y. P. F. Y. O. Alseiri, "The Impact of Artificial Intelligence Applications on the Participation of Autonomous Maintenance and Assets Management Optimisation within Power Industry : A Review," pp. 113–121, 2020.
- [49] "Le 'système sensoriel' du véhicule_Bosch." [Online]. Available: http://fr.bosch-automotive.com/fr_FR/parts_and_accessories/electrical_system_and_accessories/sensors_17.
- [50] "OneWatt." [Online]. Available: <https://www.onewatt.eu/>.
- [51] J. H. . Holland, "Genetic Algorithms understand Genetic Algorithms," *Sci. Am.*, vol. 267, no. 1, pp. 66–73, 1992.
- [52] "Algorithme génétique — Wikipédia." [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_génétique.
- [53] D. E. (David E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, vol. 27, no. 02. 1989, pp. 27-0936-27-0936.
- [54] "Réseau de neurones artificiels - Wikipédia." [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_de_neurones_artificiels.
- [55] R. Berger, "Predictive maintenance—Is the timing right for predictive maintenance in the manufacturing sector?," *Rol. Berger*, no. november, 2015.
- [56] F. A. Tillman, C. L. Hwang, and W. Kuo, "Optimization Techniques for System Reliability with Redundancy—A Review," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. R-26, no. 3, pp. 148–155, 1977.
- [57] R. Dekker, "Applications of maintenance optimization models: a review and analysis," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 51, no. 3, pp. 229–240, 1996.
- [58] A. Gosavi, *Simulation- Based Optimization:Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning*. 2015.
- [59] A. Andijani and S. Duffuaa, "Critical evaluation of simulation studies in maintenance systems," *Prod. Plan. Control*, vol. 13, no. 4, pp. 336–341, 2002.
- [60] N. Rezg, X. Xie, and Y. Mati, "Joint optimization of preventive maintenance and inventory control in a production line using simulation," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 42, no. 10, pp. 2029–2046, 2004.
- [61] L. Tlili, M. Radhoui, A. Chelbi, and N. Rezg, "Generalized reliability models and preventive maintenance policy for systems subject to competing dependent failure processes," in *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 2164–2169.

- [62] V. Boschian, N. Rezg, and A. Chelbi, "Contribution of simulation to the optimization of maintenance strategies for a randomly failing production system," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 197, no. 3, pp. 1142–1149, 2009.
- [63] N. Rezg, A. Chelbi, and X. Xie, "Modeling and optimizing a joint inventory control and preventive maintenance strategy for a randomly failing production unit: Analytical and simulation approaches," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 18, no. 2–3, pp. 225–235, 2005.
- [64] A. M. Law and M. G. McComas, "Simulation-based optimization," in *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002, vol. 1, no. 1, pp. 41–44.
- [65] A. A. Alabdulkarim, P. D. Ball, and A. Tiwari, "Applications of simulation in maintenance research," *World J. Model. Simul.*, vol. 9, no. 1, pp. 14–37, 2013.
- [66] A. Alrabghi and A. Tiwari, "A review of simulation-based optimisation in maintenance operations," *Proc. - UKSim 15th Int. Conf. Comput. Model. Simulation, UKSim 2013*, pp. 353–357, 2013.
- [67] A. Alrabghi and A. Tiwari, "A novel framework for simulation-based optimisation of maintenance systems," *Int. J. Simul. Model.*, vol. 15, no. 1, pp. 16–28, 2016.
- [68] A. Gupta and C. Lawsirirat, "Strategically optimum maintenance of monitoring-enabled multi-component systems using continuous-time jump deterioration models," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 306–329, 2006.
- [69] O. Roux, M. A. Jamali, D. A. Kadi, and E. Châtelet, "Development of simulation and optimization platform to analyse maintenance policies performances for manufacturing systems," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 21, no. 4, pp. 407–414, 2008.
- [70] H. Allaoui and A. Artiba, "Integrating simulation and optimization to schedule a hybrid flow shop with maintenance constraints," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 47, no. 4, pp. 431–450, 2004.
- [71] L. Wang, J. Chu, and W. Mao, "An optimum condition-based replacement and spare provisioning policy based on Markov chains," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 387–401, 2008.
- [72] L. Warrington, J. A. Jones, and N. Davis, "Modelling of maintenance, within discrete event simulation," *Proc. Annu. Reliab. Maintainab. Symp.*, pp. 260–265, 2002.
- [73] A. Van Horenbeek and L. Pintelon, "A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 120, pp. 39–50, 2013.
- [74] J. a Ramírez-Hernández *et al.*, "Optimal preventive maintenance scheduling in semiconductor manufacturing systems: Software tool and simulation case studies," *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 23, no. 3, pp. 477–489, 2010.
- [75] J. P. Kenné and A. Gharbi, "Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 46, no. 4 SPEC. ISS., pp. 865–875, 2004.
- [76] A. Oyarbide-Zubillaga, A. Goti, and A. Sanchez, "Preventive maintenance optimisation of multi-equipment manufacturing systems by combining discrete event simulation and multi-objective evolutionary algorithms," *Prod. Plan. Control*, vol. 19, no. 4, pp. 342–355, 2008.
- [77] A. Arab, N. Ismail, and L. S. Lee, "Maintenance scheduling incorporating dynamics of production system and real-time information from workstations," *J. Intell. Manuf.*, vol. 24, no. 4, pp. 695–705, 2013.
- [78] J. A. Ramírez-Hernández and E. Fernandez, "Optimization of preventive maintenance scheduling in semiconductor manufacturing models using a simulation-based approximate dynamic programming approach," *49th IEEE Conf. Decis. Control December 15-17, 2010*, pp. 3944–3949, 2010.

- [79] X. Yao, E. Fernández-Gaucherand, M. C. Fu, and S. I. Marcus, "Optimal preventive maintenance scheduling in semiconductor manufacturing," *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 17, no. 3, pp. 345–356, 2004.
- [80] M. Marseguerra, E. Zio, and L. Podofillini, "Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 77, no. 2, pp. 151–165, 2002.
- [81] Y. Lei, J. Liu, J. Ni, and J. Lee, "Production line simulation using STPN for maintenance scheduling," *J. Intell. Manuf.*, vol. 21, no. 2, pp. 213–221, 2010.
- [82] M. A. Burhanuddin, A. R. Ahmad, and M. I. Desa, "An Application of Decision Making Grid to Improve Maintenance Strategies in Small and Medium Industries," *2007 2nd IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 455–460, May 2007.
- [83] A. BRUZZONE and E. BOCCA, "Innovative Solutions Based on Simulation Combined With Optimization Techniques for Maintenance Service Management Within Complex Systems," *Int. J. Model. Simulation, Sci. Comput.*, vol. 03, no. 02, p. 1240004, 2012.
- [84] M. El Hayek, E. van Voorthuysen, and D. W. Kelly, "Optimizing life cycle cost of complex machinery with rotatable modules using simulation," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 333–347, 2005.
- [85] D. Cerri and S. Terzi, "Simulation-based optimisation of the life cycle cost of industrial systems," *Int. J. Prod. Lifecycle Manag.*, vol. 8, no. 3, p. 216, 2015.
- [86] B. Hollocks, J. Banks, and J. S. C. II, "Discrete-Event Systems Simulation," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 36, no. 5, p. 455, 2006.
- [87] S. O. Duffuaa, M. Ben-Daya, K. S. Al-Sultan, and A. A. Andijani, "A generic conceptual simulation model for maintenance systems," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 207–219, 2001.
- [88] Y. Xiang, C. R. Cassady, and E. A. Pohl, "Optimal maintenance policies for systems subject to a Markovian operating environment," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 62, no. 1, pp. 190–197, 2012.
- [89] Y. Hani, H. Chehade, L. Amodeo, and F. Yalaoui, "Simulation based optimization of a train maintenance facility model using genetic algorithms," *2006 Int. Conf. Serv. Syst. Serv. Manag.*, vol. 1, pp. 513–518, 2006.
- [90] A. Gharbi and J. P. Kenné, "Maintenance scheduling and production control of multiple-machine manufacturing systems," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 48, no. 4, pp. 693–707, 2005.
- [91] S. Gan, Z. Zhang, Y. Zhou, and J. Shi, "Joint optimization of maintenance, buffer, and spare parts for a production system," *Appl. Math. Model.*, vol. 39, no. 19, pp. 6032–6042, 2015.
- [92] Y. Hani, L. Amodeo, F. Yalaoui, and H. Chen, "Simulation based optimization of a train maintenance facility," *J. Intell. Manuf.*, vol. 19, no. 3, pp. 293–300, 2008.
- [93] G. Linneusson, A. Ng, and T. Aslam, "Justifying maintenance studying system behavior: a multi-purpose approach using multi-objective optimization," *35th Int. Conf. Syst. Dyn. Soc. 60th Anniv. Syst. Dyn. Celebr.*, pp. 1–21, 2017.
- [94] O. Roux, D. Duvivier, G. Quesnel, and E. Ramat, "Optimization of preventive maintenance through a combined maintenance-production simulation model," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 143, no. 1, pp. 3–12, 2013.
- [95] A. Ali, X. Chen, Y. Ziming, J. Lee, and N. Jun, "Optimized maintenance design for manufacturing performance improvement using simulation," *Comput. Ind.*, vol. 57, no. 2, pp. 530–534, 2015.
- [96] R. Sarker and A. Haque, "Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation," *Appl. Math. Model.*, vol. 24, no. 10, pp. 751–760, 2000.
- [97] E. C. Johansson and M. Jägstam, "Maintenance planning using simulation-based optimization," *Proc. 2010*

Spring Simul. Multiconference - SpringSim '10, p. 1, 2010.

- [98] J. J. McCall, "Maintenance Policies for Stochastically Failing Equipment: A Survey," *Manage. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 493–524, Mar. 1965.
- [99] Y. Sherif and M. Smith, "Optimal maintenance models for systems subject to failure—a review," *Nav. Res. Logist. Q.*, vol. 28, no. 1, pp. 47–74, 1981.
- [100] K. S. Park, "Condition-Based Predictive Maintenance by Multiple Logistic Function," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 42, no. 4, pp. 556–560, 1993.
- [101] M. L. Abdunour, G. Dudek, R.A., and Smith, "Effect of maintenance policies on the just-in-time production," *Syst. Int. J. Prod. Res.*, vol. 33, pp. 565–583, 1995.
- [102] M. Adda, Y. Benyssaad, A. Chaker, M. Adda, Y. Benyssaad, and A. Chaker, "Maintenance Optimization by Reliability for Power Distribution Systems," *Int. Rev. Model. Simulations*, vol. 7, no. 4, p. 613, Aug. 2014.
- [103] D. Sillivant, "Reliability centered maintenance cost modeling: Lost opportunity cost," *2015 Annu. Reliab. Maintainab. Symp.*, pp. 1–5, 2015.
- [104] H. Mahfoud, A. El Barkany, and A. El Biyaali, "Preventive Maintenance Optimization in Healthcare Domain: Status of Research and Perspective," *J. Qual. Reliab. Eng.*, vol. 2016, 2016.
- [105] X. Jin, B. A. Weiss, D. Siegel, and J. Lee, "Present Status and Future Growth of Advanced Maintenance Technology and Strategy in US Manufacturing," *Int J Progn Heal. Manag 2016*, vol. 7, no. January, pp. 1–18, 2016.
- [106] L. Wang, J. Chu, W. Mao, and Y. Fu, "Advanced maintenance strategy for power plants - Introducing intelligent maintenance system," *Proc. World Congr. Intell. Control Autom.*, vol. 2, pp. 7444–7448, 2006.
- [107] S. H. Ding and S. Kamaruddin, "Maintenance policy optimization—literature review and directions," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 76, no. 5–8, pp. 1263–1283, 2014.
- [108] Y. Dijoux, M. Fouladirad, and D. T. Nguyen, "Statistical inference for imperfect maintenance models with missing data," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 154, pp. 84–96, 2016.
- [109] A. Van Horenbeek, L. Pintelon, and P. Muchiri, "Maintenance optimization models and criteria," *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 1, no. 3, pp. 189–200, Sep. 2010.
- [110] V. P. F. Pintelon L, "Maintenance decision making," 2006.
- [111] "An application of decision making grid to improve maintenance strategies in small and medium industries."
- [112] L. Aw, "A decision analysis model for maintenance policy selecting using CMMS," 2004.
- [113] L. Aw, "World-class maintenance using a computerized maintenance management system," 1998.
- [114] S. Patnaik, Ed., *Recent Developments in Intelligent Nature-Inspired Computing*. IGI Global, 2017.
- [115] K. L. Narasimhamu, V. V. Reddy, C. S. P. Rao, K. L. Narasimhamu, V. V. Reddy, and C. S. P. Rao, "Optimization of Buffer Allocation in Manufacturing System Using Particle Swarm Optimization," *Int. Rev. Model. Simulations*, vol. 8, no. 2, p. 212, Apr. 2015.
- [116] G. Ananth, B. K. Vinayagam, G. Ananth, and B. K. Vinayagam, "A Genetic Algorithm Based Total Productive Maintenance Model in Comparison with Neural Networks for Small and Tiny Enterprises," *Int. Rev. Model. Simulations*, vol. 6, no. 1, pp. 181–188, Feb. 2013.

-
- [117] M. Aabid, A. Elakkary, N. Sefiani, M. Aabid, A. Elakkary, and N. Sefiani, "PID Parameters Optimization Using Ant-Colony Algorithm for Human Heart Control," *Int. Rev. Model. Simulations*, vol. 10, no. 2, p. 94, Apr. 2017.
 - [118] A. Despujols, "Optimisation de la maintenance par la fiabilité (OMF)," *Tech. l'Ingénieur*, no. MT9310 V1, p. 22, Oct. 2012.
 - [119] L. Guo and J. Kang, "An extended HAZOP analysis approach with dynamic fault tree," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 38, pp. 224–232, Nov. 2015.
 - [120] E. Gascard and Z. Simeu-Abazi, "Quantitative Analysis of Dynamic Fault Trees by means of Monte Carlo Simulations: Event-Driven Simulation Approach," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 180, pp. 487–504, Dec. 2018.
 - [121] K. Durga Rao, V. Gopika, V. V. S. Sanyasi Rao, H. S. Kushwaha, A. K. Verma, and A. Srividya, "Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 94, no. 4, pp. 872–883, Apr. 2009.
 - [122] Y. Baqqal, M. El Hammoumi, Y. Baqqal, and M. El Hammoumi, "Modelling and Optimization Techniques for Maintenance Systems Using Simulation: a Systematic Literature Review," *Int. Rev. Model. Simulations*, vol. 12, no. 3, p. 152, Jun. 2019.
 - [123] D. Pannell, "Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies," *Agric. Econ.*, vol. 16, no. 2, pp. 139–152, May 1997.
 - [124] B. Iooss and P. Lemaître, "A Review on Global Sensitivity Analysis Methods," Springer, Boston, MA, 2015, pp. 101–122.
 - [125] H. Paynter, "An epistemic prehistory of bond graphs," *Bond graphs for engineers*. pp. 3–17, 1992.
 - [126] V. Damić, J. Montgomery, V. Damić, and J. Montgomery, "Object-oriented Approach to Modelling," in *Mechatronics by Bond Graphs*, Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 71–97.
 - [127] W. Borutzky and J. Granda, "Bond graph based frequency domain sensitivity analysis of multidisciplinary systems," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 216, no. 1, pp. 85–99, Feb. 2002.
 - [128] J. J. Granda and J. Reus, "New developments in bond graph modeling software tools: The computer aided modeling program CAMP-G and MATLAB," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1997, vol. 2, pp. 1542–1547.
 - [129] "Bond-graph modeling - IEEE Journals & Magazine." [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4140745>.
 - [130] D. Karnopp, D. L. Margolis, and R. C. Rosenberg, *System dynamics : a unified approach*. Wiley, 1990.
 - [131] P. J. Gawthrop and G. P. Bevan, "A tutorial introduction for control engineers," *IEEE Control Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 24–45, Apr. 2007.
 - [132] "Simulation Software Comparison: Discrete Event Simulation Competitors – AnyLogic Simulation Software." [Online]. Available: <https://www.anylogic.com/resources/white-papers/simulation-software-comparison/>.
 - [133] M. Ben-Daya, S. O. Duffuaa, J. Knezevic, D. Ait-Kadi, and A. Raouf, *Handbook of maintenance management and engineering*. Springer London, 2009.

ANNEXES

Annexe [1] : Questionnaire de diagnostic de la Fonction Maintenance (ADEPA-CETIM)

L'intégrale des questions est regroupée dans les tableaux ci-dessous. Ils sont adaptés du cadre de diagnostic de la fonction de maintenance d'ADEPA et CETIM.

Activity section	Question
1. Equipment Management	We have an inventory by location, line ... equipment
	This inventory is kept up to date (changes, deletions, additions ...)
	There is a coding that cuts the equipment up to the spare part
	For each equipment, we know the conditions of good operation
	For each equipment, we know the conditions of intervention
	For each equipment, we know the necessary spare parts
	For each equipment, we know the necessary tools
	For each equipment, we have the history of the work
	Codes (equipment / subassemblies / parts) are easily visible
	For each equipment, we have updated plans and diagrams
	It is possible to quickly find interventions performed on equipment
	For each piece of equipment, the degree of urgency of repair is known
	The histories are analyzed at least once a year
	Each equipment has a unique identification number
	Each equipment has a technical file

Activity section	Question
2. Maintenance of 1st, 2nd and 3rd level	Forms are used to formalize the operations for each important equipment
	There is a known way of triggering operations
	First, 2nd and 3rd level intervention monitoring cards are used
	We have a way to enter or record abnormalities detected during an intervention
	Interventions of 1st, 2nd and 3rd level are planned
	The monitoring of the operations of the three levels are regularly updated
	There is a history taking into account the activity of machines and lubricant additions
	There is a nomenclature and monitoring of maintenance products of 1 °, 2 ° and 3 ° level

Activity section	Question
3. Stock and Spare parts management	A formalized procedure is used for Purchase Requisitions (DA)
	Stored items are codified
	There are datasheets for each specific part and replacement
	Obsolete parts are eliminated if necessary
	The stock level and its value are known by the maintenance department
	Parts are correctly stored, identified and located in a store
	For each stored part, we know the supplier (s)
	For each part, we know the lead time
	Interchangeable parts (standards) are known and identified
	Maintenance has its shop
	Quickly available parts are available from our suppliers
	There is a formal management of the inputs / outputs store
	The security threshold, or stock replenishment threshold is defined (for critical parts)
	Consumptions are analyzed

Activity section	Question
4. Scheduling of Work	We prioritize maintenance calls according to the importance of the equipment
	There is a known way to trigger DI / OT / BT interventions
	DIs are tracked (registration, choice, breakdown, planning)
	A report is made after each intervention (RI)
	A new works structure is in place
	There is a management of various corrective, preventive work ...
	There is a call structure and monitoring of subcontracted or co-contracted work
	The constraints of the production are taken into account in the management of the works
	There are operating ranges for complex work

	The safety instructions to be observed are given on the BT or specific documents
	There is a known way of managing priorities for triggering DIs
	OT / BT / RI are classified and archived according to each equipment

Activity section	Question
5. Analysis of: Reliability, Maintainability, Availability and Security (FMDS)	There is a structure and a formalism to record the information
	Each intervention is filed and archived
	Each intervention is analyzed (costs, time, ...)
	Analyzes are compiled to produce indicators and / or a dashboard
	For main equipment, we know a good functioning indicator
	For main equipment, a time indicator is known
	For main equipment, there is an indicator of availability
	For the main equipment, we know the conditions of intervention
	We have equipment to do conditional (or provisional) maintenance
	The performances are tracked (by equipment, by machine, by ...)
	We have the history of the work for each equipment
	The histories are analyzed at least once a year
	The effectiveness of the maintenance function is controlled

Activity section	Question
6. Cost Analysis	Maintenance manages its budget
	We can quickly know the budget situation of the maintenance
	The budget is broken down by type of maintenance
	Service accounting tracks budgeted, committed, realized costs
	The breakdown of costs is by nature (goods, lines ...), by type of intervention, by destination
	The maintenance department is autonomous for purchases below a ceiling cost

	There is a management of external interventions (subcontracting, co-contracting ...)
	The value of the stock of spare parts is perfectly known
	For main equipment, maintenance costs are known
	The results of the maintenance activity, in terms of costs, are displayed and visible to all

Activity section	Question
7. Database	Work progress is recorded for long and important interventions
	There is a database of suppliers (costs, quality, delays ...)
	There is a suitable and sufficient method of archiving
	A dashboard is published regularly
	IT tools are available to manage the activity
	You can consult the work history for each equipment
	A technical file is archived and kept up to date for the main equipment
	For each equipment, we have updated plans and diagrams
	Supplier catalogs and technical documentation are easily accessible

Activity section	Question
8.Planning - Prevention	Planning is carried out according to the availability of the equipment, the Production Plan
	Planning is done according to the availability of human resources
	Planning is carried out according to the availability of tools and parts
	We know how to allocate resources according to needs (time, procedures, tools ...)
	Preventive interventions are planned
	The workload to be performed is controlled
	We regularly issue a report on the activity of the load (planned, in process, realized)
	The follow-up and the adaptation of the preventive actions is ensured by a person of the service

	There is a weekly schedule for starting work (new, corrective, improvement, ...)
	External interventions (co-contracting) are managed, prepared ...
	The progress of the work is easily visualized
	There is a way to choose the most appropriate interventionist (s) for the intervention

Annexe [2] : Logiciels de Simulation avec leurs champs d'application [132]

Logiciel	Vendeur	Champ d'application typique	Secteur des Marchés Ciblés
ANYLOGIC	Anylogic North America	Multimethod general-purpose simulation tools. Agent based, Discrete Event Simulation System Dynamics modelling	• Supply Chains • Transportation • Warehouse operations • Rail logistics • Mining • Oil and gas • Road traffic • Passenger flows • Manufacturing and material handling • Healthcare • Business processes • Asset management • Marketing • Social processes • Defense
ARENA	Rockwell Automation	Used for simulating and analyzing existing and	• Manufacturing • Supply chains

		proposed systems as well as operational analysis.	• Government • Healthcare • Logistics • Food and Beverage • Packaging • Mining • Call Centers
ENTREPRISE DYNAMICS	INCONTROL Simulation Solutions	Manufacturing, logistics, and material handling simulation	• Warehouses • Distribution centers • Airports and harbors • Healthcare and pharmaceuticals • FMCG
EXTENDSIM PRO	Imagine That Inc	Professional level tool for modeling and analyzing complex discrete rate, continuous, agent-based, and hybrid systems.	• Consumer products • Healthcare • Energy • Petro-chem • Pulp/Paper • Transportation • Pharmaceuticals • Semiconductors

			• Military and Government • Mining
FLEXSIM	FlexSim Software Products, Inc.	Simulation and modeling of any process, with the purpose of analyzing, understanding, and optimizing that process.	• Manufacturing • Packaging • Warehousing • Material handling • Supply chain • Logistics • Healthcare • Factory • Aerospace • Mining
PROMODEL OPTMIZATION SUITE	Promodel Corporation	Process Optimization and Improvement, Resource Utilization, system Capacity and Throughout, Constraints Analytics, LSS	• DoD and Government • Manufacturing • Pharmaceutical • Logistics • Warehouse and DC
SAS SIMULATION STUDIO	SAS	Discrete-Event-Simulation, Supply Chain, Resource Management, Capacity Planning, Workflow Analysis, and Cost Analysis	• Manufacturing • Banking • Pharmaceuticals and healthcare

			• Energy • Government agencies • Retail • Education • Transportation
SIMUL8 PROFESSIONAL	SIMUL8 Corporation	Assembly Line, Line Balancing Strategic planning, Operations, Healthcare Systems, BPMN, Lean, Shared Services, Capacity Plan	• Manufacturing • Healthcare • Education • Engineering • Supply chains • Logistics • Government • BPMN • Lean • Automotive • Call centers
SIMIO ENTERPRISE EDITION	SIMIO LLC	Ideal product for professional modelers and researchers. Powerful object-oriented	• Academic • Aerospace & defense • Airports • Healthcare

		modeling and integrated 3D animation for rapid model	• Manufacturing • Mining • Military • Oil and gas • Supply chains • Transportation
PLANT SIMULATION	Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.	Discrete-event simulation, visualization, analysis and optimization of production throughput, material flow, and logistics	• Automotive OEM and supplier • Aerospace and defense • Consumer products • Logistics • Electronics • Machinery • Healthcare • Consulting
WITNESS	Lanner	Fast, productive predictive simulation desktop software for professional modelling and application development.	• Business planning • Process optimization • Decision making

Annexe [3] : Capabilité de modélisation par les logiciels dans le marché [132]

Logiciel	Système d'exploitation	Logiciels compatibles pour développement personnalisé	Possibilités de contrôle ou de lancement par un autre programme
ANYLOGIC	Windows, Mac, Linux	• Excel, Access and Database, • OptQuest • Stat::Fit • Any Java/ DLL • Library e.g. Bayesian or Neural Network	AnyLogic models can be exported as standalone Java applications that can be run from/by any other application. They could be also run online via AnyLogic Cloud web service.
ARENA	Windows	OptQuest	Visual Studio for the purpose of automation as well as VB
ENTREPRISE DYNAMICS	Windows	N/A	N/A
EXTENDSIM PRO	Windows, Mac	Excel, Oracle, Access, SQL Server, MySQL.	Any Windows application that can be configured as an Automation controller, such as Excel or Access, can control and communicate with ExtendSim as a COM Automation Server.
FLEXSIM	Windows	• Excel and other database software • C++ applications	OLE and ActiveX
PROMODEL OPTIMIZATION SUITE	Windows	• Excel and Access • Stat:Fit • MiniTab	• Excel and Access, • C# • VB and VBA

SAS SIMULATION STUDIO	Windows, Linux	SAS and JMP software, either run externally or embedded via SAS Program block.	- Any program that - can launch a Java - application.
SIMUL8 PROFESSIONAL	Windows	- Excel - Stat::Fit, - OptQuest - SQL Databases	Microsoft Excel and any COM enabled IDE
PLANT SIMULATION	Windows	- Matlab - Excel - SAP - Simatic IT - Teamcenter - Autocad - Microstation	- Parameterizing from MS Excel - Siemens PLCSIM Advanced - OPC, OPC UA, ODBC - MS Windows - Oracle
WITNESS	Windows	N/A	N/A

Annexe [4] : Cas d'étude sur le système les Bond Graphs

6. Présentation du système

Un exemple typique de l'approche BG est présenté par le système masse-ressort ci-dessous :

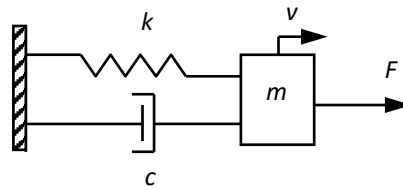


Figure 57: Système masse-ressort

Les lois mécaniques correspondantes, sont :

$$F_r = k \int v dt$$

$$F_a = c \times v$$

$$F_m = m \frac{dv}{dt}$$

Le modèle Bond Graph équivalent du système masse-ressort est le suivant :

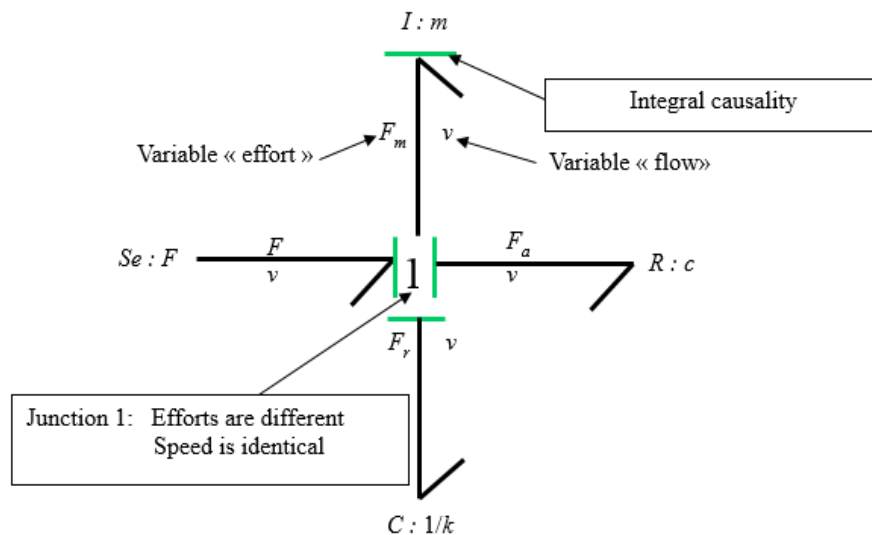


Figure 58: Modèle Bond Graphe du système masse-ressort

Les avantages de ce nouvel outil de modélisation sont la possibilité d'obtenir l'équation mathématique, la maîtrise du système de contrôle et la possibilité de diagnostiquer l'homogénéité du flux énergétique de l'ensemble du système.

7. Résultats de simulation

Sans détailler le calcul mathématique, on conclut l'équation suivante : $F = m\ddot{x} + f\dot{x} + kx$

Dans une première partie, nous introduisons le modèle équivalent dans un modèle d'environnement Matlab de Simulink :

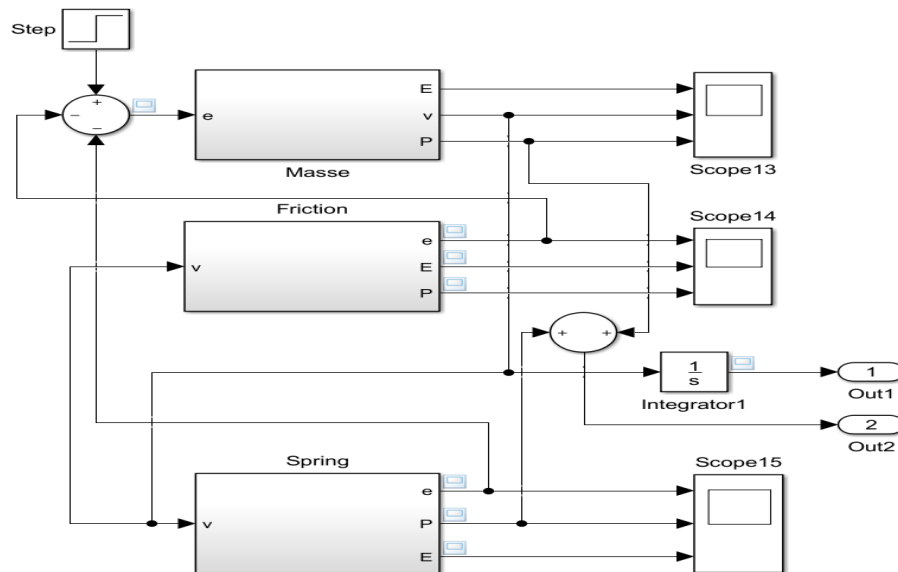


Figure 59: modélisation du système sous Simulink

Comme nous l'avons déjà mentionné dans notre approche, nous présentons les différents cas de notre concept de phénomène de perturbations :

2.1. Premier cas :

- Le Ressort est un élément contributeur "C Ph" , nous avons $F=0, f=0$.

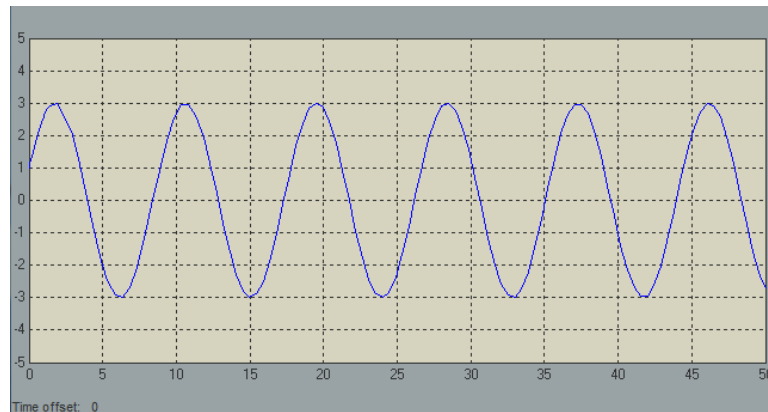


Figure 60: $P(t)$ du ressort

- L'amortisseur est donc un élément perturbateur "D Ph" :

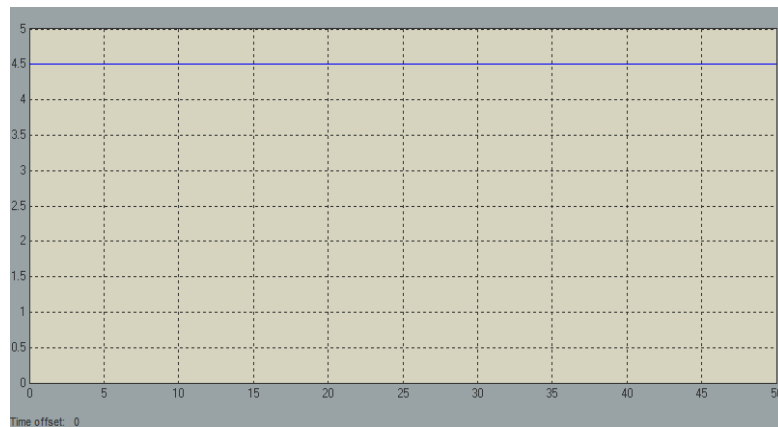
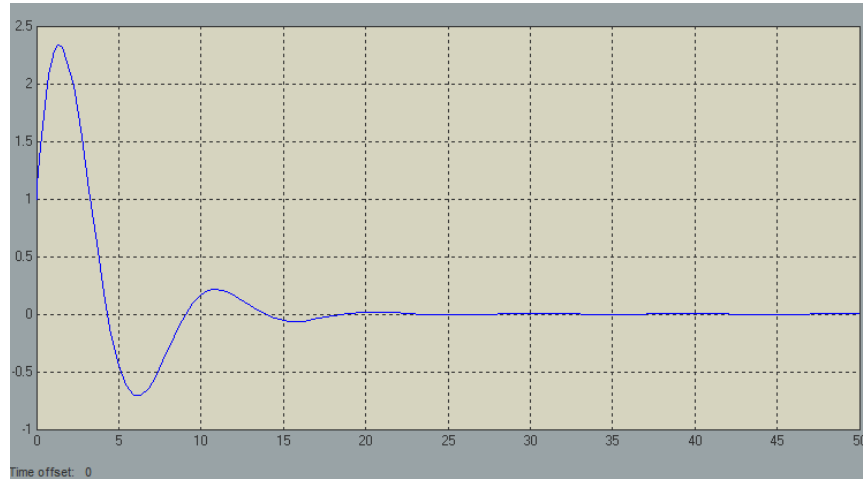
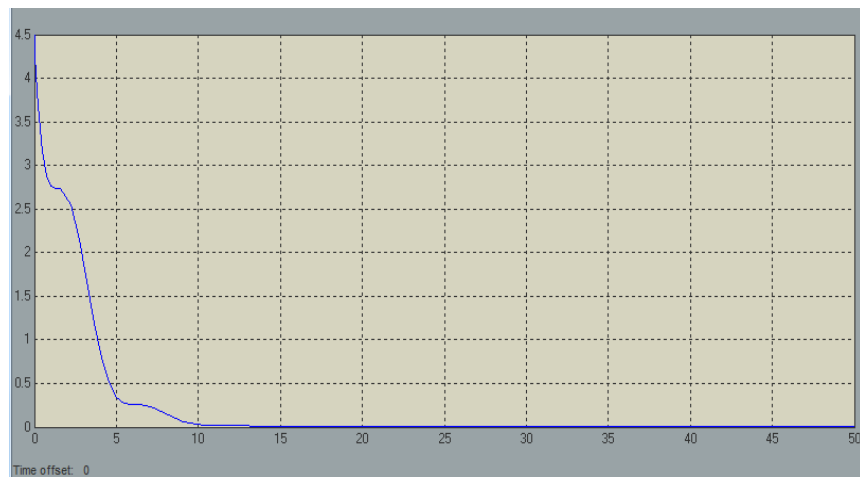


Figure 61: Énergie mécanique absorbée dans l'amortisseur

Les deux figures 60 et 61 représentent la réponse du système présentant le signal $P(t)$ et E_m ; il est clair que le ressort est figuré comme C Ph alors que l'amortisseur est un PP.

2.2. Deuxième cas :

- Le ressort est un élément perturbateur "D Ph" $F=0, f \neq 0$.
- L'amortisseur est donc un élément de contribution "C Ph"

Figure 62: Puissance $P(t)$ -deuxième casFigure 63: Énergie E_m -deuxième cas

Le second cas révèle l'influence du f quand est différent de zéro. Le ressort est échangé au comportement perturbateur ; l'amortisseur se comporte comme un élément de contribution "C Ph".

2.3. Troisième cas : Système oscillatoire avec excitation

Dans cette section, si la tâche consiste à appliquer un régime critique (par exemple, une suspension), nous devons définir le type de perturbation à conserver pour un système.

- "FR" est un amortisseur
- "PR" est une vitesse

Cas où $f = 2\sqrt{m \times k} \rightarrow$ phénomène de contribution

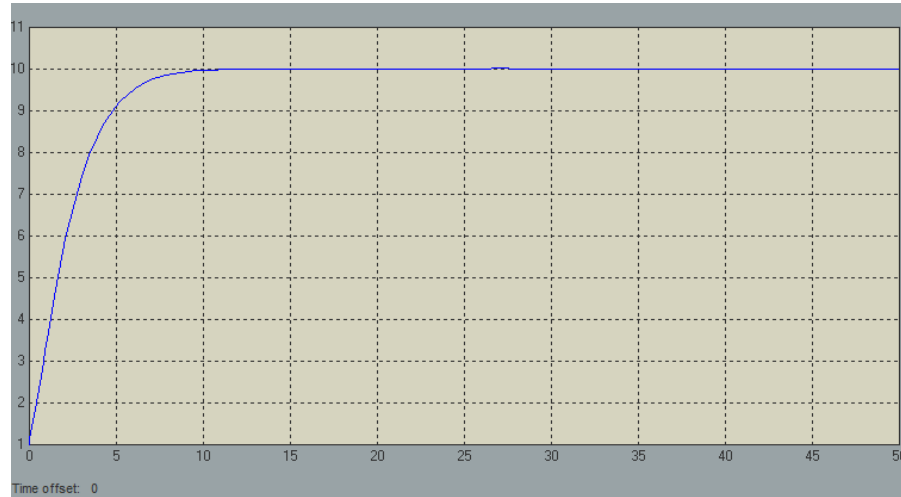


Figure 64: Puissance $P(t)$ -troisième cas

Dans le système oscillatoire à excitation, le seul cas ci-dessus présente le phénomène de contribution, il est clairement démontré avec la réponse du signal $P(t)$ sur la figure 64.

The other cases are then disruptive phenomena

Dans le cas où $f < 2\sqrt{m \times k} \rightarrow$ Régime pseudo périodique

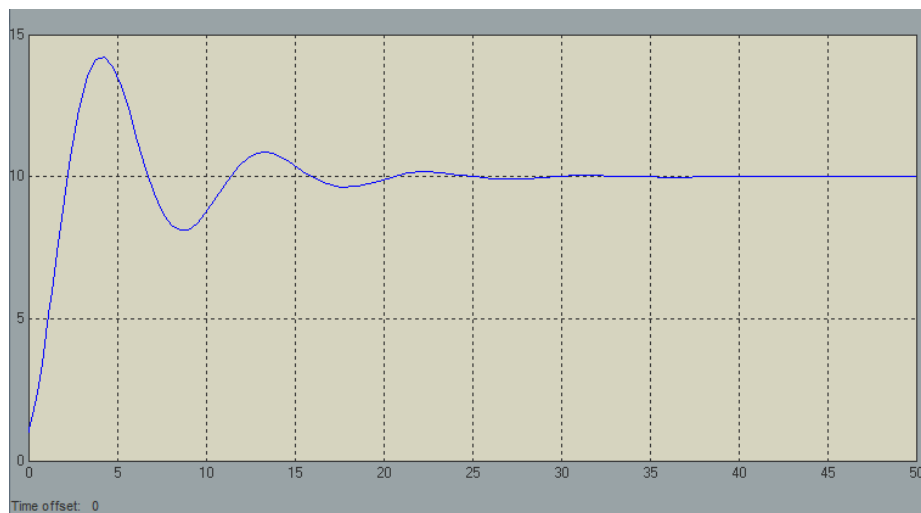


Figure 65: Puissance $P(t)$ -régime pseudo périodique

Dans le cas où $f > 2\sqrt{m \times k} \rightarrow$ Régime Apériodique

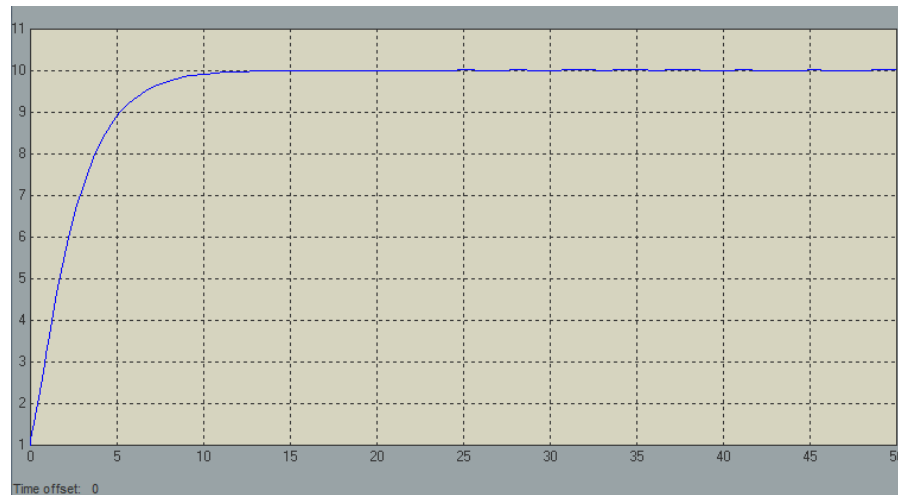


Figure 66: Puissance $P(t)$ - régime aperiodique

Pour les figures 65 et 66, le phénomène perturbateur sont respectivement les régimes pseudopériodiques et aperiodiques. Le signal $P(t)$ est illustré sur les figures correspondantes.

Annexe [5] : Détails des recherches publiées dans le domaine.

Réf	Year	authors	Journal	domain	simulation technique	simulation software	optimisation method	optimisation software
1	2000	R. Sarker and A. Haque	Appl. Math. Model	maintenance-production	DES	SIMSCRIPT II.5	not-disclosed	SIMSCRIPT II.5
2	2001	S. O. Duffuaa, M. Ben-Daya, K. S. Al-Sultan, and A. A. Andijani	J. Qual. Maint. Eng	maintenance engineering	DES	not-disclosed	not-disclosed	not-disclosed
3	2002	L. Warrington, J. A. Jones, and N. Davis	Proc. Annu. Reliab. Maintainab. Symp	maintenance engineering	DES	not-disclosed	Ultra Reliable Aircraft Model (URAM)	not-disclosed
4	2002	M. Marseguerra, E. Zio, and L. Podofillini	Reliab. Eng. Syst. Saf	maintenability & reliability	DES	not-disclosed	Genetic Algorithm & Monte carlo simulation	not-disclosed

5	2004	X. Yao, E. Fernández-Gaucherand, M. C. Fu, and S. I. Marcus	IEEE Trans. Semicond. Manuf	maintenance-production	DES	The fab-simulation	not-disclosed	not-disclosed
6	2004	H. Allaoui and A. Artiba	Comput. Ind. Eng		DES	resource-actions-operations	Simulated annealing	pseudo code
7	2004	N. Rezg, X. Xie, and Y. Mati	Int. J. Prod. Res	maintenance-production	DES	Promodel	Genetic Algorithm	Promodel
8	2004	J. P. Kenné and A. Gharbi	Comput. Ind. Eng.	manufacturing system	DES	visual SLAM and AweSim	markov process	ANOVA, STAGRAPHICS,
9	2005	A. Gharbi and J. P. Kenné	Comput. Ind. Eng	production	DES with analytical model	Visual SLAM	manual optimization	ANOVA, STAGRAPHICS,
10	2005	M. El Hayek, E. van Voorthuysen, and D. W. Kelly	J. Qual. Maint. Eng	maintenance engineering	DES	SIMAN ARENA V8	manual optimization	ARENA

11	2005	N. Rezg, A. Chelbi, and X. Xie	Int. J. Comput. Integr. Manuf	maintenance-production	DES	Promodel	manual optimization	STATGRAPHICS
12	2006	A. Gupta and C. Lawsirirat	J. Qual. Maint. Eng	maintenance engineering	Euler scheme-based continuous simulation	not-disclosed	direct search	not-disclosed
13	2006	Y. Hani, H. Chehade, L. Amodéo, and F. Yalaoui,	Int. Conf. Serv. Syst. Serv. Manag.	maintenance facility	DES	ARENA	Genetic Algorithm	Visual Basic (VB)

14	2007	M. A. Burhanuddin, A. R. Ahmad, and M. I. Desa	IEEE Conf. Ind. Electron. Appl	Decision making	Analytical & DES	Promodel	mathematical method & experimental design	STATGRAPHICS
15	2008	L. Wang, J. Chu, and W. Mao	J. Qual. Maint. Eng	maintenance engineering	Monte carlo simulation	not-disclosed	simple search in the space of the decision variables	not-disclosed
16	2008	A. Oyarbide-Zubillaga, A. Goti, and A. Sanchez,	Prod. Plan. Control		DES	Witness et Monte Carlo Simulation	Genetic Algorithm NSGA-II Multi-objective evolutionary algorithms	Matlab

17	2008	Y. Hani, L. Amodeo, F. Yalaoui, and H. Chen	J. Intell. Manuf		DES	ARENA	-Non-pareto approach based on genetic algorithm - pareto approach NSGA II with Genetic Algorithm	Visual Basic (VB)
18	2008	O. Roux, M. A. Jamali, D. A. Kadi, and E. Châtelet	Int. J. Comput. Integr. Manuf	manufacturing system	DES	RAO (resource–action–operation)	direct search Nelder–Mead	not-disclosed
19	2009	V. Boschian, N. Rezg, and A. Chelbi	Eur. J. Oper. Res	Maintenncce-procudction	DES	JAVA	manual optimization	manual optimization
20	2010	E. C. Johansson and M. Jägstam	Proc. 2010 Spring Simul. Multiconference	maintenance engineering	DES	not-disclosed	Genetic Algorithm NSGA II	Python
21	2010	J. a Ramírez-Hernández et al	IEEE Trans. Semicond. Manuf	manufacturing system	DES	PMOST AutoSched AP	not-disclosed	- IBM optimization solution library (OSL) - ILOG CPLEX

22	2010	J. A. Ramírez-Hernández and E. Fernandez	49th IEEE Conf. Decis. Control	manufacturing system	markov process	intel mini-Fab	manual optimization	heuristic approach
23	2010	Y. Lei, J. Liu, J. Ni, and J. Lee,	J. Intell. Manuf	maintenance-production	DES petri-nets	Stochastic Timed Petri-Nets (STPN)	not-disclosed	not-disclosed
24	2012	Y. Xiang, C. R. Cassady, and E. A. Pohl	Comput. Ind. Eng	maintenance engineering	DES and Continous simulation	not-disclosed	Direct search cyclic coordinate method	not-disclosed
25	2012	A. BRUZZONE and E. BOCCA	Int. J. Model. Simulation, Sci. Comput	maintenance engineering	DES	LAPIS (lean advanced pooling intelligent optimizer and simulator)	genetic algorithm	not-disclosed
26	2013	A. Arab, N. Ismail, and L. S. Lee	J. Intell. Manuf	maintenance-production	DES	Promodel	Genetic Algorithm	SimRunner

27	2013	O. Roux, D. Duviolier, G. Quesnel, and E. Ramat	Int. J. Prod. Econ	maintenance-production	DES	VLE simulator	Nelder–Mead (Simplex) Method	not-disclosed
28	2013	A. Van Horenbeek and L. Pintelon	Reliab. Eng. Syst. Saf.	maintenance engineering	DES	not-disclosed	penalty function	not-disclosed
29	2014	S. M. Asadzadeh and A. Azadeh	Reliab. Eng. Syst. Saf.	maintenance engineering	DES	Matlab	Fibonacci algorithm	Minitab
30	2015	D. Cerri and S. Terzi	Int. J. Prod. Lifecycle Manag.	maintenance engineering	DES	SimEvents - matlab	Genetic Algorithm	SimEvents - matlab
31	2015	A. Ali, X. Chen, Y. Ziming, J. Lee, and N. Jun	Comput. Ind.	maintenance engineering	DES	ISSOP & ARENA	manual optimization	ISSOP & ARENA
32	2015	S. Gan, Z. Zhang, Y. Zhou, and J. Shi	Appl. Math. Model.	maintenance engineering	DES	not-disclosed	Genetic Algorithm	not-disclosed

33	2016	A. Alrabghi and A. Tiwari	Int. J. Simul. Model.	maintenance engineering	DES	not-disclosed	not-disclosed	not-disclosed
34	2017	G. Linneusson, A. Ng, and T. Aslam	35th Int. Conf. Syst. Dyn. Soc. 60th Anniv. Syst. Dyn. Celebr.	maintenance engineering	DES	not-disclosed	multi-objective optimization (MOO) analysis of a system dynamics (SD) model	not-disclosed

Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

Résumé de la thèse

Éviter la dégradation d'un système, même en cas de réserve, est impossible. La complexité des systèmes industriels rend difficile le choix optimal du mix des stratégies de maintenance dans un tel environnement. Nous avons parcouru les différentes sources de documentations pour constituer l'état de l'art pour les outils de modélisation et évaluation des stratégies pour les systèmes complexes. Ces modèles varient avec les domaines d'activités et la complexité des systèmes, ils assument, parfois, des simplifications exagérées qui remet en cause le recours au choix optimal.

Une étude de diagnostic sur terrain a été tenue pour recenser les besoins des utilisateurs et décideurs dans le domaine de la maintenance. Les exigences retenues ont été examinées avec les limitations de recherches identifiées afin de proposer un modèle générique pour la modélisation basée sur la simulation auquel se rajoute une approche de classification et identification des perturbations dans les systèmes traduisant l'apparition des défaillances dites cachées.

Le modèle proposé permet de simuler les stratégies de maintenance tenant compte des interactions entre ces stratégies et les équipements du processus de production, la possibilité d'apporter de nouvelles stratégies de maintenance est documentée pour offrir plus de flexibilité au modèle proposé. Une approche de classification des perturbations des systèmes mécaniques a été proposée en utilisant l'outil Bond Graph, permettant la modélisation des systèmes multi-énergies en se basant sur le principe du transfert d'énergie, afin de qualifier les sources de stress causants des défaillances cachées traduisant la non linéarité du comportement des systèmes industrielles complexes.

Un cas d'étude pour application de l'approche proposée a été retenu sur une centrale thermique de production de l'électricité constituant ainsi un bon exemple des systèmes complexes vu de son environnement de forte dynamique pour garantir la continuité de service du réseau électrique national.

A la fin, les limites et avantages de l'approche sont présentées pour conclure les perspectives des futurs travaux de recherches.

Mots clés : Maintenance, modélisation, simulation, stratégies, systèmes complexes.