



Université d'Oran 2
Institut de Maintenance et de sécurité Industrielle

THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat « L.M.D »
en Sécurité Prévention et Intervention

**Modélisation et Simulation des phénomènes d'Incendie :
Etude de cas**

Présentée et soutenue publiquement par :
Melle NEHAL Naima

Devant le jury composé de :

LEBSIR Hayet	Professeur	Université d'Oran 2	Présidente
LOUNIS Zoubida	Professeur	Université d'Oran 2	Directeur
LOUNIS Zakia	MCA	ENPO d'Oran	Co-directeur
BOUAMRANE Karim	Professeur	Université d'Oran 1	Examineur
SAFER Khadidja	Professeur	USTO-MB	Examineur
AISSANI Nassima	MCA	Université d'Oran 2	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Modélisation et simulation des phénomènes d'incendie : Etude de cas

Résumé :

Les incendies constituent une source de préoccupation majeure, en ce sens qu'il s'agit d'un mécanisme destructeur qui peut causer de graves dommages aux biens, aux personnes et à l'environnement. Ce phénomène est d'autant plus marqué dans l'industrie pétrolière. En raison de la nature de ses procédés et des matériaux inflammables employés, le secteur pétrolier est particulièrement vulnérable aux menaces d'incendie. Les raffineries, les sites de stockage et les bases offshore sont des types de sites pétroliers qui offrent des conditions propices au développement de gaz inflammables. Ces lieux présentent des risques inhérents aux opérations de manipulation, de stockage ou de traitement des hydrocarbures. Dans ce contexte, il convient de mettre l'accent en particulier sur les scénarios d'incendie susceptibles de survenir dans ce secteur. Une étude approfondie a été menée sur les risques et les dangers potentiels pour déterminer ces scénarios. Elle vise à identifier les situations potentielles susceptibles de conduire à un incendie. Cette thèse s'est fondée sur la théorie des probabilités, les notions de sûreté de fonctionnement et de nombreuses méthodes quantitatives d'analyse des risques. Nous sommes parvenus à définir les équations servant à déduire les facteurs d'importance probabilistes à l'aide de l'inférence bayésienne tout en présentant un état de l'art sur l'application des réseaux bayésiens en tant qu'outil puissant et efficace en analyse quantitative des risques. Afin de mettre en valeur ce travail, une application sur le système qui représente un four situé dans l'unité de distillation sous vide destinée à la fabrication des huiles de base, vient d'être étudiée au moyen d'une modélisation et d'une simulation faisant appel à plusieurs méthodes d'analyse ainsi qu'à des modèles probabilistes tels que l'AMDEC, l'HAZOP, l'arbre de défaillance, le calcul thermique des paramètres de performance de l'équipement suivi d'une simulation de Monte Carlo par loi uniforme et facteurs d'importance probabilistes. Il convient de souligner que l'étude se porte essentiellement sur la comparaison de trois cas : design, défaillance et rénovation. Pour finir, Cette étude a apporté une contribution appréciable en élaborant un modèle de réseau bayésien. Ce modèle a été utilisé pour estimer l'indisponibilité du système dans le cas de défaillance, tout en identifiant les éléments qui peuvent avoir une influence sur cette défaillance. Ce modèle a aussi servi à évaluer dans quelle mesure la rénovation a pu améliorer la disponibilité et la fiabilité du système.

Mots clés : SDF, AMDEC, HAZOP, AdD, Simulation de Monté Carlo, Réseaux Bayésien, Calcul thermique, Parametres de performance, Four, Facteurs d'importance probabilistes.

Modeling and simulation of fire phenomena: a case study

Abstract:

Fires represent a source of major concern, as a destructive mechanism that can cause serious damage to property, people and the environment. This phenomenon is particularly pronounced within the petroleum industry. The petroleum sector is particularly vulnerable to fire threats because of the nature of its processes and the flammable substances used in its operations. Sites like refineries, storage spaces, and offshore bases provide ideal conditions for the development of flammable gas. These places contain risks associated with the transportation, storage, or processing of hydrocarbons. In this context, it is necessary to focus in particular on fire scenarios that may occur within this sector. An in-depth study of potential risks and hazards has been carried out to determine these scenarios. It aims to identify potential situations that might lead to a fire. This thesis is based on probability theory, dependability concepts, and several quantitative risk analysis methods. the equations used is defined in order to deduce probabilistic importance factors using Bayesian inference while providing a state-of-the-art on the application of Bayesian networks as powerful and effective tools in quantitative risk analysis. In order to highlight this work, an application on the system representing a furnace located in the vacuum distillation unit designed for the manufacture of base oils has just been studied by means of modeling and simulation using several analysis methods as well as probabilistic models such as FMECA, HAZOP, fault tree, thermal calculation of equipment performance parameters followed by Monte Carlo simulation using uniform law and probabilistic importance factors. It should be emphasized that the study focuses on the comparison of three cases: design, failure and renovation. Finally, this study made

a significant contribution by developing a Bayesian network model. This model was used to estimate the unavailability of the system in the failure case, while identifying the elements that may have an influence on this failure. The model was also used to assess the extent to which the renovation was able to improve system availability and reliability.

Key words: Dependability, FMECA, HAZOP, FTA, Monte Carlo simulation, Bayesian networks, Thermal calculation, Performance Parameters, Furnace, Probabilistic importance factors.

نمذجة ظواهر الحريق ومحاكاتها: دراسة حالة

الملخص

تعد الحرائق مصدر قلق كبير كونها آلية مدمرة يمكن أن تسبب أضرارًا جسيمة تنجر عنها خسائر مادية و بشرية و بيئية , هذه الظاهرة ملحوظة أكثر في صناعات البترول نظرا لطبيعة عملياتها والمواد المستخدمة القابلة للاشتعال ، فإن قطاع البترول معرض بشكل خاص لتهديدات الحرائق .المصافي ومواقع التخزين والقواعد البحرية هي نماذج من مواقع النفط التي توفر ظروف ملائمة لانبعاثات الغازات ,حيث تشكل هذه المواقع مخاطر كامنة في كيفية استعمال الهيدروكربونات أو تخزينها أو معالجتها .وفي هذا السياق، ينبغي التركيز بوجه خاص على سيناريوهات الحرائق التي من الممكن أن تحدث في هذا المجال .من أجل تسليط الضوء على هذا العمل تمت دراسة حالة على نظام فرن صناعي موجود في وحدة تقطير تحت الضغط التفريري لتصنيع الزيوت الأساسية عن طريق النمذجة والمحاكاة باستخدام عدة طرق تحليلية ونماذج احتمالية مثل دراسة المخاطر وقابلية التشغيل ، تحليل أنماط الفشل وتأثيراتها وتقدير خطورتها ، شجرة تحليل الخطأ، الحساب الحراري لمؤشرات الأداء متبوعة بمحاكاة مونت كارلو بواسطة قانون توزيع منتظم وكذلك عوامل الاحتمالية ذات أهمية

الكلمات المفتاحية: الاعتمادية، دراسة المخاطر وقابلية التشغيل ، تحليل أنماط الفشل وتأثيراتها وتقدير خطورتها ، شجرة تحليل الخطأ، محاكاة مونت كارلو، شبكة بايزية ، الحساب الحراري ، مؤشرات الأداء ، فرن صناعي ، عوامل الاحتمالية ذات أهمية

Remerciements

Alhamdulillah, ce travail est mené à bien par la grâce d'Allah, le tout-puissant et le miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Le présent travail de recherche a été réalisé au sein du Laboratoire de l'Ingénierie de la Sécurité Industrielle et du Développement Durable (LISIDD) de l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle (IMSI) de l'Université Mohamed Ben Ahmed Oran 2. Je suis très reconnaissante d'avoir eu l'opportunité de pouvoir travailler au sein de ce laboratoire.

Je tiens à remercier tous les intervenants qui m'ont apporté leur aide dans la réalisation de cette thèse. Tout d'abord, je tiens à remercier Madame LOUNIS Zoubida, pour avoir endossé la responsabilité de directrice de thèse. Elle a su me guider dans mon travail et m'aider à trouver des pistes de solutions pour aller de l'avant, être toujours disponible et à l'écoute en dépit de ses responsabilités, me conseiller et me motiver durant tout ce travail.

Mes remerciements les plus vifs vont à Madame LOUNIS Zakia de l'École Nationale Polytechnique d'Oran Maurice-Audin, pour sa contribution essentielle à la réussite de ce travail. Elle m'a prodigué ses conseils et ses encouragements perpétuels durant cette expérience.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur GUETARNI Islam Hadj Mohamed pour l'aide inestimable qu'il m'a apporté dans la révision de ma thèse. pour ses précieux conseils, sa disponibilité et le temps qu'il m'a accordé durant la réalisation de mon travail.

Je présente mes remerciements à Madame LEBSIR Hayet, Professeur à l'Université Mohamed Ben Ahmed Oran 2, et Madame AISSANI Nassima, MCA à l'Université Mohamed Ben Ahmed Oran 2, d'avoir accepté de prendre part au jury.

Je tiens également à remercier Monsieur BOUAMRANE Karim, Professeur à l'Université Ahmed Ben Bella Oran 1, et Madame SAFER Khadidja, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf, d'avoir accepté de faire partie du jury.

Je suis profondément reconnaissante de l'immense support apporté par mes aimables collègues, je vous remercie d'être toujours là pour moi.

Je tiens à adresser un véritable remerciement à ma famille, qui compte beaucoup pour moi. Tout au long de ce parcours, leur grand amour, leur support inconditionnel et leur omniprésence ont été pour moi une réelle source d'inspiration et de motivation. Je suis vraiment reconnaissante d'avoir à mes côtés une telle famille bienveillante et encourageante.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des abréviations

AdD	Arbre de défaillance
AdE	Arbre d'Événement
AMDEC	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets et leur Criticité
ARIA	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
BRA	Brut Réduit Atmosphérique
SPO	Spindle Oil
MVO	Medium Viscous Oil
VO	Viscose Oil
BTS	Barrière Technique De Sécurité
BAMS	Barrières à Action Manuelle de Sécurité
BIS	Barrières Instrumentées de Sécurité
ESD	Emergency Shut Down (Arrêt d'urgence)
EPI	Équipement de Protection Individuelle
FMDS	Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Sécurité
FIM	Facteur d'importance probabiliste marginale de Birnbaum
FIPs	Facteurs d'importance probabilistes
FCC	Fluid Catalytic Cracking
FCV	Flow Control Valve
FRC	Flow Recording Controller
FT	Flow Transmitter
HAZOP	hazard and operability
HCO	Hand Cut Off
ICMESA	Industrie Chimiche-Meda-Societa Azionaria
MDT	durée moyenne d'indisponibilité après défaillance « Mean Dawn Time ».
MMR	Mesures de Maîtrise des Risques
MTBF	durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité ayant fait l'objet d'une réparation « Mean Time Between Failure ».
MTTF	durée moyenne de fonctionnement jusqu'à la première défaillance « Mean Time To Failure »
MTTR	durée moyenne de réparation « Mean Time To Repair »
MUT	durée moyenne de fonctionnement après réparation « Mean Up Time ».
RB	Réseau Bayésien
RdP	Réseau de Pétri
RETEX	Retour d'expérience
NFPA	National Fire Protection Association
OREDA	Offshore Reliability Data
PDT	Transmetteur de pression différentielle
PID	Piping and Instrumentation Diagram
PIC	Pressure Indication Controller
PII	Plan Interne d'Intervention
POI	Plan d'Opération Interne
PCV	Pressure Control Valve
PC	Plan Blanc
UVCE	Unconfined Vapor Cloud Explosion
sdf	Sûreté de fonctionnement
TI	Temperature indicator
TPC	Table de probabilités conditionnelles

Nomenclature

$\lambda(t)$	Taux de défaillance
$Q_{conduction}$	Quantité de chaleur absorbée par conduction ($kcal/h$).
$Q_{convection}$,	Quantité de chaleur absorbée par convection ($kcal/h$).
η	Rendement thermique (%).
$Q_{entrée}$	Quantité de chaleur dégagée par la combustion ($kcal/h$).
Q_{paroi}	Pertes de chaleur à travers la paroi réfractaire ($kcal/h$).
$Q_{fumées}$	Pertes de chaleur par les fumées ($kcal/h$).
PCI_i	Pouvoir calorifique inférieur des différents constituants du gaz combustible ($kcal/Nm^3$).
$Q_{radiation}$	Quantité de chaleur absorbée par radiation ($kcal/h$).
k	Conductivité thermique du matériau ($J.m / K^\circ$)
ε_t	Emissivité des tubes
T_t	Température de la surface des tubes ($^\circ K$).
α	Facteur d'absorption des tubes
σ	Constante de la loi de Stefan Boltzmann ($Kcal/h.m^2.K^4$).
F	Coefficient global d'échange par rayonnement adimensionnel.
αA_{cp}	Surface du Corps noir équivalente à la surface d'absorption des tubes (m^2).
T_g	température des gaz de combustion à l'intérieur de la zone de radiation ($^\circ K$).
$T_{fumées}$	Température des fumées (C°).

H	Enthalpie des fluides ($kcal/Nm^3$).
C_p	Chaleur spécifique des fluides ($kcal/Nm^3 \cdot C^\circ$).
ε_f	Emissivité brut des gaz de combustion
f	Débit volumique (Nm^3/h).
Y_i	Pourcentage molaire des différents constituants du gaz combustible.
T_{air}	Température d'entrée d'air (C°).
$R(t)$	Fiabilité
$F(t)$	Défiabilité
$M(t)$	Maintenabilité
$U(t)$	L'indisponibilité
$A(t)$	Disponibilité
S	Surface d'échange (m^2)
T_0, T_1	Température correspond au paroi externe et interne de tube (K°)
$I_{Y_i}^{Pr}(t)$	Facteur d'importance Marginale de Birnbaum
$I_{Y_i}^{Cr}(t)$	Facteur d'importance Critique
l_e	étant l'épaisseur utile des gaz de combustion (m)
G	graphe acyclique dirigé
l	longueur des tubes (m)
e	épaisseur entre paroi interne et externe de tube (m)
$\mu(t)$	Taux de réparation

Glossaire

Fluage est un mécanisme de déformation graduelle et progressive qui survient généralement à des températures élevées. Il résulte de l'application continue et prolongée de contraintes constantes (température, pression) provoquant une déformation croissante du matériau avec le temps.

Système est un ensemble de composants apparentés qui agissent de manière coordonnée pour accomplir une mission donnée. Chaque élément, qu'il soit de nature structurelle, technologique ou physique, apporte au système une contribution coordonnée et complémentaire à sa fonctionnalité globale.

Point d'éclair est la température la plus basse atteinte par un liquide qui libère assez de vapeurs inflammables pour se combiner à l'air et prendre feu. Il s'agit d'une mesure cruciale pour déterminer dans quelle mesure il est sûr de manipuler et de stocker des matières inflammables.

Température d'Auto-inflammation désigne la température où une substance s'enflamme de manière spontanée sans aucune source d'inflammation.

Point d'ébullition est la température à laquelle, à pression donnée, le liquide devient gazeux lorsqu'on lui apporte de la chaleur, il est alors en ébullition.

Plan d'Opération Interne « POI » a pour objectif de fournir aux entreprises un moyen efficace de prévention, de contrôle et d'aide à la décision dans le cadre de la gestion de situations de crise. Il est destiné à organiser la réponse face à des situations à caractère accidentel dans des lieux industriels soumis à l'obligation.

Plan blanc « PC » est un système de gestion de crise destiné à répondre à une situation exceptionnelle susceptible de se produire dans l'industrie, comme un incendie, une explosion, une fuite accidentelle d'un produit toxique, etc.

Un composant désigne une part de système (équipement et/ou événements) pour laquelle on dispose de suffisamment d'informations qualitatives (conditions de service, modes de défaillance, etc.) et quantitatives (fréquences de défaillance, temps de fonctionnement, etc.). La nature, la quantité et la qualité des composants, ainsi que leur disposition, ont un effet direct sur la fiabilité du système.

Plan d'intervention interne (PII) est un outil permettant de se préparer à une action d'urgence en cas de danger grave. Il est fondé sur : un examen approfondi du danger et de ses effets, la capacité à prévoir les crises, la capacité à maîtriser leurs effets (sur les personnes, les biens, et sur le plan organisationnelle).

Entité désigne tout composant, sous-système, système, équipement ou unité opérationnelle qui peut être assimilé à un élément individuel.

Mode de défaillance un effet selon lequel un défaut ou une panne est détecté.

Réparable un élément qui est capable, d'un point de vue technico-économique, de faire l'objet d'une remise en état.

Panne incapacité d'une entité à exécuter une fonction demandée, selon des conditions données de fonctionnement

Tables des matières

Remerciement

Liste des abréviations

Nomenclature

Glossaire

Table des Matières

Table des Figures

Table des Tableaux

Introduction Générale.....	1
Contexte	1
Problématique de recherche.....	3
Intérêt et objective de la thèse.....	3
Chapitre I. Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement	
I.1. Introduction.....	8
I.2 Fours industriels : concept de base	9
I.2.1. Différentes classifications des fours industriels	9
I.2.1.1. Four continu ou discontinu	9
I.2.1.2. Traitement thermique direct ou indirect	10
I.2.1.3. Chauffage selon la température	10
I.2.1.4 Types de combustibles : nature de l'énergie fournie	11
I.3. Rôle des fours : un élément essentiel dans de nombreux procédés industriels.....	11
I.4. Critères à prendre en considération afin de choisir un four industriel.....	12
I.5. Caractéristiques d'un four tubulaire classique.....	15
I.5.1. Principaux types de fours	19
I.5.1.1. Fours cylindriques	19
I.5.1.2. Fours cabines	20
I.5.2. Systèmes de tirage pour une combustion efficace et sûr	21
I.5.3. Dépannage du four	23
I.5.3.1. Choc de flamme.....	23

I.5.3.2. Points chauds	23
I.5.3.3. Cokage et décokage	24
I.5.3.4. Soufflage de suie	24
I.6. Modes de transfert de chaleur dans un four	24
I.6.1. Transfert de chaleur par conduction	25
I.6.2. Transfert de chaleur par convection	25
I.6.3. Transfert de chaleur par rayonnement	26
I.7. Paramètres de performance	27
I.7.1. Rendement η	27
I.7.1.1. Pertes par les parois	27
I.7.1.2. Pertes par les fumées	28
I.7.1.3 Détermination du rendement d'un four sur la base des pertes de chaleur à travers les parois et les fumées	29
I.7.1.4. Détermination du rendement d'un four à partir d'un calcul thermique effectué selon la méthode Lobo Evans	31
I.7.2. Quantité de chaleur absorbée <i>Qabsorbée</i>	34
I.7.3. Coefficient globale d'échange thermique par convection <i>h</i>	35
I.8. Effets sur l'environnement des émissions de polluants émis par les fours industriels.....	37
I.8.1. Polluants	37
I.8.2. Réglementation des émissions de gaz	38
I.9. Conclusion	38
Chapitre II. Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées	
II.1. Introduction	43
II.2. Mettre à profit l'expérience passée pour renforcer la performance et la sécurité des systèmes : L'importance du retour d'expérience "RETEX"	43
II.3. Retour d'expérience dans l'industrie : valoriser l'expérience acquise au service de l'efficacité des procédés industriels	44

II.4. Méthodologie et principales étapes de l'analyse et de l'acquisition de connaissances tirées de l'expérience passée.....	45
II.5. Accidentologie des fours industriels.....	45
II.5.1. Retours d'expérience issu de la base de données ARIA.....	46
II.5.1.1. Raffinage de pétrole « 07/12/2005, France (Petit-Couronne) »	46
II.5.1.2. Raffinage de pétrole « 19/06/2006, France (Petit-Couronne) »	46
II.5.1.3. Raffinage de pétrole « 05/10/1972, France (Nouvelle-Calédonie) »	47
II.5.1.4. Raffinage de pétrole « 26/10/1967, France (Nouvelle-Calédonie) »	47
II.5.2. Explosion de l'unité FCC à la raffinerie Husky Superior 2018.....	47
II.5.3. Explosion et incendie dans la raffinerie Tesoro	48
II.5.4. Explosion du four 100-F1, Algérie (Skikda 2013)	49
II.6. Les grands risques sur les fours industrielles	50
II.6.1. Incendie et explosion.....	50
II.6.1.1. Feu de nappe	51
II.6.1.2. Feu de jet.....	51
II.6.1.3. Explosion UVCE.....	51
II.6.2. Retour de flamme au niveau des brûleurs	52
II.6.3. Surpression à l'intérieur du four	52
II.6.4. Risque lié à la corrosion.....	53
II.6.5. Formation de coke.....	53
II.6.6. Exposition aux substances dangereuses	53
II.6.7. Défaillance de certains composants de l'équipement	53
II.6.8. Dangers et Risques électriques.....	54
II.6.9. Toxicité par le monoxyde de carbone	54
II.6.10. Erreur humaine.....	54
II.6.11. Brûlure et autre type de blessure.....	55
II.7. Aperçu sur différents types de barrières de sécurité utilisées en milieu industriel.....	55

II.7.1. Barrières techniques de sécurité.....	55
II.7.1.1. Dispositifs de sécurité (passifs).....	56
II.7.1.2. dispositifs de sécurité actifs	57
II.7.1.3. Barrières instrumentées de sécurité (BIS).....	58
II .7.2. Barrières à action manuelle de sécurité (BAMS).....	58
II.7.2.1. Barrières de verrouillage/étiquetage	58
II.7.3. Barrières humaines de sécurité.....	59
II.8. Mesures préventives mises en place pour prévenir des accidents de fours industriels	60
II.8.1. les instruments de contrôle.....	60
II.8.2. Détection d'incendie	61
II.8.2.1. Détection de flamme	61
II.8.2.2. Détection de gaz inflammable.....	61
II.8.3. Système de protection contre l'incendie.....	62
II.8.3.1. Protection incendie active	62
II.8.3.2. Protection Incendie Passive.....	63
II.8.4. Autre mesure de protection contre l'incendie	64
II.9. Normes et réglementations pour la sécurité des fours industrielles	64
II.9.1. Norme internationale.....	65
II.9.2. Réglementation Algérienne.....	65
II.9.3. Référentiels de SONATRACH	66
II.10. Synthèse globale	67
II.11. Conclusion.....	69
Chapitre III. Analyse par sûreté de fonctionnement : concepts et Revue de littérature	
III.1. Introduction	72
III.2. Sûreté de fonctionnement des systèmes	73
III.2.1. Concept de la sûreté de fonctionnement	74
III.2.2. Principaux éléments de la Sdf.....	74

III.2.2.1. Fiabilité $R(t)$	75
III.2.2.2. Disponibilité $A(t)$	76
III.2.2.3. Maintenabilité $M(t)$	76
III.2.2.4. Sécurité	77
III.2.3. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement.....	77
III.2.4. Défaillance dans les procédés industriels	78
III.2.4.1. Taux de défaillance $\lambda(t)$	79
III.2.4.2. Taux de réparation $\mu(t)$	80
III.2.4.3. Le taux de défaillance à la sollicitation.....	81
III.2.5. Approche de la fiabilité par les probabilités : des modèles mathématiques pour mesurer et optimiser la performance des systèmes et des composants.	82
III.2.6. Quelques lois de probabilités courantes.....	83
III.2.6.1. Lois de probabilité en cas de variables aléatoires discrètes.....	83
III.2.6.2. Lois de probabilité en cas de variables aléatoires continues.....	83
III.3. Concept de système	84
III.3.1. Système et composant : définition, rôle et relation pour une fonction efficace.	84
III.3.2. Mode de fonctionnement d'un système	86
III.3.3. la fiabilité du système pour un fonctionnement efficace	86
III.3.3.1. Système série	87
III.3.3.2. Système parallèle	88
III.3.3.3. Redondance active et passive.....	88
III.3.4. Composants mécaniques du système : nécessité de prendre en compte la complexité des mécanismes de dégradation.....	89
III.3.5. Garantir la fiabilité tout au long du cycle de vie des systèmes.....	89
III.3.6. Modélisation de la fiabilité des systèmes.....	91
III.3.7. collecte de données et Bases de données pour l'analyse par sdf.....	91
III.4. Conclusion.....	92

Chapitre IV. Analyse des risques : démarches et méthodes de base du Sûreté de fonctionnement

IV.1. Introduction.....	96
IV.2. Analyse fonctionnelle du système.....	99
IV.3. Généralité sur les Méthodes d'évaluation des Risques.....	100
IV.3.1. Analyse qualitative / quantitative	100
IV.3.1.1. Méthodes qualitatives	100
IV.3.1.2. Méthodes quantitatives	101
IV.3.2. Analyse inductive / déductive.....	101
IV.3.2.1. Méthodes inductives	101
IV.3.2.2. Méthodes déductives	101
IV.3.3. Analyse statiques/dynamiques.....	102
IV.3.3.1. Méthodes statiques	102
IV.3.3.2. Méthodes dynamiques	102
IV.4. Analyse dysfonctionnelle : méthodes d'identification et d'évaluation des risques	103
IV.4.1. AMDE / AMDEC	104
IV.4.1.1. AMDE (Analyse des modes de défaillances, de leurs effets).....	104
IV.4.1.2. AMDEC (L'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité)	105
IV.4.2. HAZOP	107
IV.4.3. Arbre de défaillance.....	109
IV.4.3.1. Analyse qualitative	111
IV.4.3.2. Analyse quantitative	111
IV.4.3.3. Facteurs d'importance probabilistes (FIP)	112
IV.4.4. Arbre d'évènement	114
IV.4.5. Nœud papillon	115
IV.4.6. Simulation de Monte Carlo.....	116
IV.4.7. Réseau de Petri	117

IV.4.7.1. Sémantique -exécution pour évaluer un réseau de pétri	119
IV.4.7.2. RdP stochastiques classique :	120
IV.4.7.3. RdP stochastiques généralisés :	120
IV.4.7.4. RdP stochastiques déterministes :	120
IV.4.8. Graphes de Markov	121
IV.4.9. Réseaux bayésiens	122
IV.5. Méthodes pour maîtriser les risques : limites et avantages	122
IV.6. Comment bien choisir une méthode d'analyse des risques ?	125
IV.7. Conclusion	126
 Chapitre V. Démarche bayésienne pour l'analyse des risques	
V.1. Introduction	128
V.2. Réseau bayésien : une vue d'ensemble historique et théorique	129
V.2.1. Présentation de l'approche Bayésienne : Théorème de Bayes.....	129
V.2.2. Caractéristiques des réseaux bayésiens.....	131
V.2.3. Inférence bayésienne.....	133
V.2.4. Optimisation du réseau bayésien : méthodes de simplification	134
V.2.5. Modélisation dynamique par les réseaux bayésiens	134
V.2.6. Les Réseaux Bayésiens : un outil prometteur pour la modélisation probabiliste	135
V.2.7. Réseaux bayésiens : contraintes et limites	136
V.3. Analyse et gestion des risques à l'aide du réseau bayésien	137
V.3.1. Application des réseaux bayésiens comme outil pour analyser les risques	137
V.3.2. Interprétation de AdD en RB pour l'analyse des risques.....	138
V.3.2.1. Structure du réseau bayésien à partir de l'arbre des défaillances : conditions pour une mutation de l'AdD au RB	140
V.3.2.2. Réseau bayésien issu à partir d'arbre de défaillance en présence des événements répétés.....	143
V.3.2.3. L'inférence bayésienne générée par AdD	145

V.3.3. Facteur d'importance probabiliste en RB	146
V.4. Conclusion.....	147
Chapitre VI. Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique	
VI.1. Introduction.....	152
VI.2. Méthodologie proposée.....	153
VI.3. Présentation de l'unité de distillation sous vide.....	158
VI.3.1. Description de l'unité	158
VI.3.2. Description du four sous vide (21F1).....	158
VI.3.3. Potentiels de dangers liés aux produits.....	160
VI.3.4. Potentiels de dangers liés aux procédés : Conditions opératoires du four.....	160
VI.4. Analyse de la fiabilité du four : étude de cas à partir de scénarios d'incendie.....	161
VI.4.1. Problématique abordée	161
VI.4.1.1. Bilan du premier accident du four 21F1	161
VI.4.1.2. Bilan du deuxième accident du four 21F1	165
VI.4.1.3. Travaux de rénovation du four 21F1	168
VI.4.2. Scénarios et phénomènes dangereux liés au four 21F1	172
VI.4.2.1. Analyse par AMDEC et HAZOP du four 21F1	172
VI.4.2.2. Résultats retenus selon les méthodes HAZOP et AMDEC	222
VI.4.3. Données recueillies pour l'étude de fiabilité du four	224
VI.4.4. Elaboration de l'arbre de défaillance	226
VI.4.5. Étude par un réseau bayésien du scénario de l'incendie du four 21F1	231
VI.4.5.1. Structure du RB issu de l'ADD.....	231
VI.5. Application de la méthode de calcul thermique pour déterminer les paramètres de performance du four 21F1.....	232
VI.5.1. Détermination du rendement thermique du four 21F1	233
VI.5.1.1. Étude de cas du design.....	233
VI.5.1.2. Étude de cas réel (cas de défaillance).....	237

VI.5.1.3. Étude de cas réel (cas après rénovation).....	241
VI.5.2. Détermination de la quantité de chaleur absorbée par le fluide à réchauffer (BRA) du four 21F1	244
VI.5.3. Détermination du coefficient global de transfert de chaleur (h) du four 21F1	244
VI.5.3.1. Etude cas design	244
VI.5.4. Comparaison des résultats obtenus entre les trois cas	248
VI.5.5. Simulation de Monté Carlo.....	254
VI.6. Paramètres de performance du four 21F1 dans le RB.....	255
VI.6.1. Interprétation des résultats obtenus à partir des paramètres de performance intégrés dans le réseau bayésien.....	260
VI.6.2. Variation de l'indisponibilité des éléments identifiés en fonction du temps dans les trois études (design, défaillance et rénovation)	261
VI.6.3. Comparaison entre l'ADD et le RB	261
VI.7. Conclusion : Synthèse générale de l'étude de cas	262
Conclusion générale	266
Revue de la thèse	267
Perspectives	268

Annexes

Annexe A: Calcule thermique suivant la méthode Lobo Evans

Annexe B: Principales lois de probabilité et bases de données pour la sûreté de fonctionnement

B.1.Principales lois de probabilité au profit de la fiabilité.....	289
B.1.1. Loi exponentielle.....	289
B.1.2. Loi de Weibull.....	289
B.1.3. Loi normale	290
B.1.4. Loi log-normale ou loi de Galton.....	290
B.1.5. Loi uniforme.....	291
B.2. Bases de données pour la sûreté de fonctionnement	291

B.3. Restrictions liées à l'utilisation des bases de données	293
--	-----

Annexe C: Aperçu sur les méthodes d'analyse prédictive

C.1. Méthode AMDEC.....	295
C.1.1. Analyse des défaillances	295
C.1.2. Criticité des modes de défaillance.....	296
C.2. Méthode de l'arbre de défaillance.....	297
C.3. Etude HAZOP.....	298
C.3.1. Mots guides	299

Table des Figures

Figure I.1. Vue schématique de la structure d'un four, exemple de four cylindrique vertical [22]	18
Figure I.2. Exemple de récupérateur continu [20].....	19
Figure I.3. Différents types du four cylindrique [26]	20
Figure I.4. Four cabine [26].....	21
Figure I.5. Types de systèmes de tirage	22
Figure I.6. Dépôt de coke à l'intérieur de tube.....	23
Figure I.7. Souffleur de suie	24
Figure I.8. Bilan thermique du four.....	29
Figure II.1. Fumée de l'incendie de la raffinerie Husky Superior [38].....	48
Figure II.2. Explosion à l'unité 100 de la raffinerie de Skikda [41].....	50
Figure II.3. Représentation schématique d'un BIS [58]	58
Figure II.4. Représentation schématique d'un BAMS [58]	59
Figure II.5. Typologie des barrières de sécurité [58]	59
Figure II.6. Schéma récapitulant le retour d'expérience sur les accidents de four, avec l'extension pour chaque section (a), (b) et (c).	68
Figure III.1. Principaux éléments de la sûreté de fonctionnement [68].....	73
Figure III.2. Décroissance de la fiabilité en fonction du temps	75
Figure III.3. Courbe de disponibilité d'un composant.....	76
Figure III.4. Courbe de maintenabilité d'un équipement [85].....	77
Ces durées sont représentées dans la figure III.4.....	78
Figure III.5. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement [69]	78
Figure III.6. Variation du taux de défaillance dans le temps : courbe en baignoire	80
Figure III.7. Différence entre un système compliqué et un système complexe [69]	85
Figure III.8. Différentes configurations de système [88]	87
Figure III.9. Différentes méthodes et outils pour le processus d'élaboration de la fiabilité tout au long du cycle de vie d'un produit [88]	90
Figure IV.1. Représentation schématique des tâches d'une analyse prévisionnelle	99
Figure IV.2. Rapprochement entre l'axe du déroulement des événements et les modes d'analyse du système [104]	101
Figure IV.3. Etapes de l'élaboration de l'AMDE [104].....	105
Figure IV.4. Organigramme de la méthode AMDE (NF EN 60812).....	107

Figure IV.5. Organigramme de la méthode HAZOP	109
Figure IV.6. Exemple de Structure d'un arbre de défaillance.....	111
Figure IV.7. Exemple de la structure d'arbre d'événement	115
Figure IV.8. Exemple sur la structure du réseau de Petri [132]	118
Figure IV.9. Développement du système par le tir des transitions [132]	119
Figure IV.10. Modèle markovien	122
Figure V.1. Principe de l'inférence bayésienne.....	130
Figure V.2. Graphe acyclique dirigé : B est la cause de C	131
Figure V.3. Réseau bayésien d'un système de détection d'incendie.....	133
Figure V.4. simulation d'un système de détection d'incendie	133
Figure V.5. Transformation depuis l'arbre des défaillances au réseau bayésien par l'algorithme de conversion	140
Figure V.6. Exemple de Structure d'un arbre de défaillance	141
Figure V.7. Structure du réseau bayésien créée à partir de la Figure V.6	141
Figure V.8. Exemple de l'AdD en présence de l'évènement répété.....	144
Figure V.9. Réseau bayésien en présence d'un nœud répété.....	144
Figure V.10. Exemple de l'AdD avec une branche répétée.....	145
Figure V.11. Exemple de RB correspondant à l'AdD de la Figure V.10.....	145
Figure VI.1. Organigramme de la méthodologie proposée pour l'étude d'un scénario d'incendie dans un four, avec une extension pour chaque section (a) et (b).....	156
Figure VI.1. Suite : extension pour chaque section (a) et (b).....	157
Figure VI.2. Variation de la température des tubes des deux passes jusqu'à l'accident survenu en février 2011.....	162
Figure VI.3. Présence de produit noir sur les guides de gaines du tube N°17	163
Figure VI.4. Fuite de la charge dans le tube numéro 17.....	164
Figure VI.5. Présence d'une fissure dans la partie supérieure du tube N°17 d'une longueur de 200 mm	164
Figure VI.6. Déformation des tubes N°11,12, 13, 14, 15, 16, 17, 18	164
Figure VI.7. Présence d'une couche de coke sur les parois internes des tubes qui varie entre 15 et 20 mm.....	165
Figure VI.8. Nid d'hydrocarbure sur le tube N°18.....	166
Figure VI.9. fissure directionnelle du tube N°18 du serpentin N°2.....	167
Figure VI.10. Forte dégradation par oxydation sous l'effet de haute température des ailettes des tubes.	167
Figure VI.11. Oxydation des tubes du serpentin N°2.....	167
Figure VI.12. Ancien serpentin.....	170
Figure VI.13. Travaux de rénovation.....	170

Figure VI.14. Rénovation du four 21F1.....	171
Figure VI.15. Représentation du procédé de distillation sous vide de l'unité 21.....	172
Figure VI.16. Evaluation des risques avant réduction selon la méthode AMDEC.....	229
Figure VI.17. Évaluation des risques après réduction suite aux travaux de rénovation effectués.....	230
Figure VI.18. Structure de l'arbre de défaillance pour présenter l'incendie du four avec l'extension de l'événement intermédiaire (a), où les événements de base sont mentionnés dans le tableau VI.7.....	233
Figure VI.19. Structure du réseau bayésien pour un scénario d'incendie du four 21F1, où les nœuds racines sont listés dans le tableau VI.7.....	238
Figure VI.20. Représentation des températures d'entrée et de sortie du fluide, des températures des fumées et de la paroi des tubes selon les trois cas étudiés.....	254
Figure VI.21. Variation du rendement thermique en fonction de la quantité de chaleur selon les trois cas étudiés.....	256
Figure VI.22. Variation des nombres Reynolds et Nusselt en fonction des trois cas étudiés..	258
Figure VI.23. Variation du coefficient de transfert de chaleur h en fonction de la température d'entrée et de sortie du fluide pour les trois cas étudiés.....	259
Figure VI.24. Extrait sélectif du modèle bayésien mettant en évidence la structure élaborée dans le cas du design.....	262
Figure VI.25. Étude de scénarios d'incendie du four 21F1 dans le cas de défaillance en utilisant RB à partir des paramètres de performance obtenus.....	263
Figure VI.26. Extrait sélectif du modèle bayésien mettant en évidence les résultats après rénovation du four sur la base des paramètres de performance déterminés dans ce cas.....	263
Figure VI.27. Variation de l'indisponibilité des composants en fonction du temps dans les trois cas étudiés.	265

Table des Tableaux

Tableau III.1. Différentes lois de probabilité [69,73,88].	84
Tableau IV.1 Principales Méthodes de base de Sdf.	103
Tableau IV.2. Synthèse sur les avantages et les limites des méthodes d'analyse des risques.	123
Tableau V.1. Quelques études menées dans le cadre du passage de l'arbre de défaillance vers les réseaux bayésiens.	138
Tableau V.2. Nœud intermédiaire1 : TPC de la porte logique « OU ».	143
Tableau V.3. Nœud intermédiaire 2: TPC de la porte logique « K/N ».	143
Tableau V.4. Nœud Pivot: TPC de la porte logique « ET».	143
Tableau VI.1. Caractéristiques générales du four sous-vide 21F.	159
Tableau VI.2. Propriétés physico-chimiques des produits du four.	160
Tableau VI.3. Récapitulatif du TIS du four 21F1 avant l'accident	161
Tableau VI.4. Récapitulatif du TIS du four 21F1 après l'accident.	162
Tableau IV.5. Feuille de programmation de l'AMDEC.	172
Tableau VI.6. Résultats de l'étude HAZOP – Feuille de travail Nœud n°01 et Nœud n°02.	191
Tableau VI.7. Données relatives aux composants du four.	230
Tableau VI.8. Portes logiques pour chaque évènement intermédiaire et sous-système.	233
Tableau VI.9. Nombre de coupes minimales et leurs influences sur l'évènement principal avec exemple d'indisponibilité pour chaque ordre à t = 7860 h ...	236
Tableau VI.10. Comparaison des FIPs obtenus par l'ADD et le RB avec l'indisponibilité de chaque élément dans le cas de design suite aux choix des composants ayant un impact important sur le système dans le cas de défaillance.	236
Tableau VI.11. Caractéristiques de fonctionnement du four 21F1 dans le cas du design.	239
Tableau VI.12. Résultats des calculs pour le cas design.	240
Tableau VI.13. Perte de chaleur par les fumées pour 100 Nm ³ de gaz combustible dans le cas de design	242
Tableau VI.14. Caractéristiques de fonctionnement du four 21F1 dans le cas de défaillance.	243
Tableau VI.15. Résultats des calculs pour le cas de défaillance.	244
Tableau VI.16. Pouvoirs calorifiques et pourcentages molaires du gaz combustible.	245

Tableau VI.17. Perte de chaleur par les fumées pour 100 Nm ³ de gaz combustible dans le cas de défaillance.....	246
Tableau VI.18. Caractéristiques de fonctionnement du four 21F1 dans le cas de la rénovation.....	247
Tableau VI.19. Résultats des calculs pour le cas de rénovation.....	248
Tableau VI.20. Propriétés thermiques de la charge BRA pour les trois cas étudiés.....	250
Tableau VI.21. Résultats des nombres de Reynolds , de Nusselt et le coefficient de transfert de chaleur en fonction du diamètre des tubes dans le cas du design.....	252
Tableau VI.22. Résultats des nombres de Reynolds , de Nusselt et le coefficient de transfert de chaleur en fonction du diamètre des tubes dans le cas de défaillance.....	252
Tableau VI.23. Résultats des nombres de Reynolds , de Nusselt et le coefficient de transfert de chaleur en fonction du diamètre des tubes dans le cas de rénovation.....	253
Tableau VI.24. Synthèse globale des résultats obtenus du coefficient de transfert de chaleur "h" pour les trois cas étudiés.....	253
Tableau VI.25. Probabilité des paramètres de performance pour chaque cas étudié.....	260
Tableau VI.26. Comparaison entre les facteurs d'importance probabilistes obtenus par l'AdD et le RB avec l'indisponibilité de chaque composant dans le cas de défaillance.....	262
Tableau VI.27. Comparaison entre les facteurs d'importance probabilistes obtenus par l'AdD et le RB avec l'indisponibilité de chaque composant dans le cas de rénovation.....	263
Tableau VI.28. Comparaison entre l'indisponibilité des composants en fonction du temps selon les trois cas étudiés.....	263
Tableau VI.29. Synthèse générale des résultats de l'étude pour les trois cas étudiés.....	267

Introduction Générale

Contexte

En raison de la grande complexité des procédés industriels et des équipements. Les unités industrielles sont confrontées à des risques potentiels importants liés à des incendies, des explosions violentes, etc. Sans compter que des effets dominos peuvent également amener à des conséquences graves pour les personnes, les installations, l'environnement et l'économie en cas d'accidents majeurs. Ces dangers nécessitent une vigilance permanente en termes de sécurité industrielle pour limiter les risques d'accidents et éviter les dommages humains et économiques.

Dans la plupart des raffineries, les procédés mis en œuvre nécessitent de la chaleur fournie par un four, qui tient une place très importante « de fait, c'est le cœur de l'unité », cette étude porte sur simulation dynamique et analytique d'un scénario d'incendie dans un four installé au niveau d'une industrie pétrolière. Généralement les opérations de traitement thermique dans les unités pétrochimiques représentent une activité dangereuse qui met en péril à la fois les personnes et l'environnement du fait de la température élevée, de la présence de produits chimiques, ou encore de matières inflammables, de rejets toxiques ainsi que des risques d'explosions.

Afin de maintenir un niveau de sécurité sur les lieux de travail tout en atteignant les objectifs visés en matière de production, il est nécessaire que les sociétés adoptent une démarche de sécurité exhaustive. Cette démarche comprend une série d'étapes, notamment des études d'analyse des risques plus Approfondie et plus concrètes afin d'identifier les aspects fondamentaux de la sécurité des équipements thermiques et de mettre en place des mesures de contrôle permettant de répondre de manière optimale aux exigences de sécurité tout au long de la durée de vie des équipements thermiques. Fondées sur les principes de sûreté de fonctionnement, des méthodes qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives d'analyse des risques ont été créées à cette fin : un ensemble de données recueillies à partir de retours d'expérience ou de diagnostics effectués par des experts offrent une connaissance complète du système étudié.

Les méthodes d'analyse qualitative des risques telles que l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets et leur criticité (AMDEC) [69,72,92] et l'analyse par HAZOP [5,6] sont particulièrement adaptées à l'analyse approfondie de chaque composant [84], et à

l'identification des déviations potentielles des paramètres clés liés au fonctionnement du système qui constitue le four et à la manière dont la charge circule à l'intérieur du four. L'arbre de défaillance (AdD) [1,2,3,4] est également, reconnue comme étant l'une des meilleures méthodes quantitatives, intervient dans de nombreuses activités à différents stades de leurs missions (conception, construction, fonctionnement voire même démantèlement à la fin du cycle de vie de ces équipements). Cette méthode est également adoptée comme une étude approfondie pour identifier les scénarios d'incendie dans un four. L'AMDEC une méthode qui permet de déterminer les principaux modes de défaillance des composants, leurs causes profondes et leurs effets sur les performances du système. Par ailleurs, l'étude des systèmes complexes et des défaillances liées au temps sont deux aspects pour lesquels un AdD standard est confronté à certaines limitations [7,8,9,10,11]. En raison de ces limitations, un certain nombre de méthodes permettant de développer efficacement la structure AdD et de déterminer l'ensemble de coupe minimale (MC) sont utilisés en vue de mener des études approfondies et dynamiques tel que la simulation de Monte Carlo (MC) [12,13,14,15], les réseaux de Petri (RdP) [9], les chaînes de Markov (CdM) [16] et les réseaux bayésiens (RB) [100,113].

En effet, le calcul des facteurs d'importance probabilistes (PIF) [113,116] reste le moyen le plus avantageux pour identifier le composant qui contribue le plus à la défaillance du système étudié par l'AdD. L'identification et le diagnostic des composants du système qui posent un risque à la disponibilité du système, dans le but principal de définir de nouvelles actions correctives ou préventives, de planifier les tâches de maintenance et/ou de concevoir le système de manière optimale, sont principalement basés sur le Facteur d'Importance Probabiliste de Birnbaum (PIF) et le Facteur d'Importance Probabiliste Critique (FIC).

Les paramètres de performance du four sont également utilisés [30,31,32,33,34,113] pour identifier les éléments qui ont le plus d'influence sur la fiabilité du système. Les performances d'un four peuvent être évaluées de manière spécifique à l'aide de mesures telles que le rendement, la chaleur absorbée et le coefficient global de transfert de chaleur, qui peuvent ensuite être utilisées pour déterminer les facteurs d'importance probabilistes. Nous pouvons évaluer les risques liés à l'exploitation d'un four, identifier les défaillances potentielles et élaborer des stratégies préventives pour réduire ces risques en appliquant des méthodes analytiques probabilistes. L'analyse de ces paramètres peut également être utilisée pour améliorer la conception des fours et respecter les lois sur l'environnement et la sécurité. Par conséquent, ces paramètres constituent un élément important pour évaluer la fiabilité et la sécurité de l'équipement industriel.

Problématique de recherche

Les systèmes complexes, tels que les fours industriels, doivent faire l'objet d'une étude approfondie des différents scénarios catastrophiques possibles afin d'identifier les risques encourus. L'analyse par l'arbre de défaillance est souvent utilisée pour ce type d'analyse, mais elle peut s'avérer limiter du point de vue de l'aide à la décision. Autrement dit, au moment où les événements se produisent. Les moyens et les techniques mis en œuvre pour évaluer les risques doivent donc être en mesure de prendre en compte les événements qui se produisent en temps réel et de fournir des informations qui aideront les décideurs à agir rapidement en cas d'urgence ou bien de crise. D'autres méthodes d'analyse des risques, notamment les réseaux bayésiens, viennent compléter l'arbre de défaillance pour remédier à ce problème. Notre étude propose d'évaluer la pertinence de l'utilisation des réseaux bayésiens pour l'analyse des scénarios d'incendie dans les fours industriels à cet égard.

Intérêt et objective de la thèse

Afin d'analyser les dangers associés aux incendies dans les fours industriels, cette thèse fait l'objet d'une mise en œuvre de la méthode des réseaux bayésiens afin de constituer un outil complémentaire à l'arbre de défaillance. Dans le but d'apporter un support décisionnel en temps réel en cas d'incendie, l'étude sera basée sur l'identification des paramètres de performance des équipements liés au four et leur intégration dans un modèle de réseau bayésien.

Cette analyse implique l'utilisation du modèle de réseau bayésien pour examiner le système à l'aide des paramètres de performance de l'équipement dans les cas de défaillance et de rénovation. La technique utilisée permettra de modéliser les relations complexes entre les différentes parties du four et de mieux identifier l'impact de ces relations sur la sécurité du système, ce qui sera démontré dans l'analyse comparative entre les deux cas. Le modèle sera alimenté par les paramètres obtenus. Ainsi, si l'on prend en compte les paramètres de performance de l'équipement, l'approche bayésienne offre un moyen raisonnable et efficace pour analyser un système complexe comme celui de notre étude.

L'originalité de ce travail apparaît lorsque les résultats collectés par la méthode de calcul thermique sont introduits dans le réseau bayésien (RB) pour analyser la fiabilité du système à partir des paramètres calculés. Par la suite, le RB est utilisé pour déterminer les facteurs d'importance probabilistes (FIP) afin d'identifier les composants du système qui ont le plus d'impact sur le système.

Pour mener à bien notre étude, le plan de travail est scindé en six chapitres principaux :

Chapitre I - dans ce premier chapitre, nous allons présenter les fours industriels, leurs rôles dans les processus industriels, les différents types de fours existants, puis nous verrons les critères de choix de ces fours et nous expliquerons en quoi chaque critère est important pour l'efficacité globale du procédé. Ce chapitre comprend également une partie sur le calcul thermique des paramètres de performance du four, qui seront utilisés dans l'étude de cas.

Chapitre II – le deuxième chapitre sera consacré au concept de retour d'expérience et son utilité dans l'analyse des risques industriels. Nous spécifions les principaux risques pouvant survenir dans les fours industriels et nous présentons des exemples de retours d'expérience sur les causes d'incendies et d'explosions. Enfin, nous allons présenter un aperçu sur les différents types de barrières de sécurité utilisées dans les environnements industriels ainsi que des différentes normes et réglementations relatives à la sécurité des fours industriels qui sont pertinentes pour notre étude.

Chapitre III - le troisième chapitre porte sur une revue de littérature relative aux principes de la sûreté de fonctionnement en général et aux concepts fondamentaux qui y sont associés, à savoir la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité, en expliquant respectivement chaque élément et d'autres aspects traités dans ce chapitre, tels que la métrique de la sûreté de fonctionnement et le concept de système dans toutes ses caractéristiques.

Chapitre IV - dans le quatrième chapitre, les différentes méthodes d'analyse du risque, y compris celles que nous avons adoptées dans le cadre de notre étude, seront abordées. Tout en classant ces méthodes selon leurs modes de raisonnement, nous évoquons également leurs inconvénients et leurs avantages. Nous présentons aussi les critères de choix afin de déterminer la méthode la mieux adaptée à l'analyse des risques d'un système.

Chapitre V- le chapitre cinq mettra l'accent sur les réseaux bayésiens, qui sont considérés comme la phase la plus cruciale de notre démarche de recherche, en donnant un aperçu général de l'approche bayésienne. Ensuite, notre principal objectif sera l'utilisation des réseaux bayésiens pour la sûreté de fonctionnement, ainsi que la méthodologie de réaliser le réseau à partir de l'arbre de défaillance. En outre, nous expliquons comment nous sommes parvenus aux résultats des facteurs d'importance probabilistes au moyen de calculs de probabilité à posteriori fondés sur l'inférence bayésienne. En conclusion de ce chapitre, il devient possible de

développer un modèle approprié pour l'analyse d'un scénario d'incendie dans un four, lequel sera présenté dans le prochain chapitre.

Chapitre VI- le sixième chapitre est consacré à l'étude d'un scénario d'incendie dans un four située au niveau de l'unité de distillation sous vide. Cette étude porte sur trois cas : le cas de design, le cas défaillant et le cas après rénovation. En appliquant la méthode du réseau bayésien et de l'arbre de défaillance pour l'analyse des risques, les paramètres de performance thermique du four obtenus sont intégrés dans l'étude de sûreté de fonctionnement. Les résultats sont ensuite présentés pour chaque cas et nous les utilisons pour évaluer la fiabilité du système et mettre en évidence les composants qui ont le plus d'influence sur l'indisponibilité du système.

Une conclusion est proposée à la fin du travail, ainsi que plusieurs perspectives futures. L'objectif de ce travail est de fournir une vue d'ensemble des résultats de notre recherche et des principales conclusions qui en ont été tirées. Il souligne l'importance de la sûreté de fonctionnement des fours industriels et la nécessité d'adopter une approche intégrée pour identifier les dangers et garantir la sécurité du personnel comme de l'environnement. Les contributions de l'étude seront mises en évidence dans la conclusion, qui expliquera également les résultats obtenus et les méthodes suivies.

Enfin, des annexes viennent compléter le contenu des différents chapitres présentés dans la thèse.

Chapitre I

Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

Sommaire du chapitre :

I.1. Introduction.....	8
I.2. Fours industriels : concept de base	9
I.2.1. Différentes classifications des fours industriels	9
I.2.1.1. Four continu ou discontinu	9
I.2.1.2. Traitement thermique direct ou indirect	10
I.2.1.3. Chauffage selon la température	10
I.2.1.4 Types de combustibles : nature de l'énergie fournie.....	11
I.3. Rôle des fours : un élément essentiel dans de nombreux procédés industriels.....	11
I.4. critères à prendre en considération afin de choisir un four industriel.....	12
I.5. caractéristiques d'un four tubulaire classique	15
I.5.1. Principaux types de fours	19
I.5.1.1. Fours cylindriques.....	19
I.5.1.2. Fours cabines	20
I.5.2. Systèmes de tirage pour une combustion efficace et sûr	21
I.5.3. Dépannage du four	23
I.5.3.1. Choc de flamme	23
I.5.3.2. Points chauds	23
I.5.3.3. Cokage et décokage	24
I.5.3.4. Soufflage de suie.....	24
I.6. Modes de transfert de chaleur dans un four	24
I.6.1. Transfert de chaleur par conduction.....	25
I.6.2. Transfert de chaleur par convection	25

I.6.3. Transfert de chaleur par rayonnement.....	26
I.7. Les paramètres de performance	27
I.7.1. Rendement η	27
I.7.1.1. Pertes par les parois	27
I.7.1.2. Pertes par les fumées.....	28
I.7.1.3 Détermination du rendement d'un four sur la base des pertes de chaleur à travers les parois et les fumées	29
I.7.1.4. Détermination du rendement d'un four à partir d'un calcul thermique effectué selon la méthode Lobo Evans.....	31
I.7.2. Quantité de chaleur absorbée $Q_{absorbée}$	34
I.7.3. Coefficient globale d'échange thermique par convection h	35
I.8. Effets sur l'environnement des émissions de polluants émis par les fours industriels.....	37
I.8.1. Polluants	37
I.8.2. Réglementation des émissions de gaz	38
I.9. conclusion	38

I.1. Introduction

Depuis la révolution industrielle, les techniques de production n'ont cessé d'être optimisées dans le but de satisfaire les besoins accrus du secteur manufacturier. L'un des aspects les plus importants de cette évolution est le besoin de chauffer les produits de façon à augmenter leurs températures afin de faciliter une phase de production subséquente ou de changer leurs structures d'une forme à l'autre.

Les fours industriels ont considérablement évolué au fil du temps. Depuis les premiers fours de base alimentés au bois, au charbon jusqu'aux fours modernes dotés de technologies innovantes comme l'énergie solaire [19], la fabrication de ces appareils thermiques a connu une évolution constante. En outre, l'importance des facteurs liés à la sécurité et à l'environnement lors de la conception et de l'exploitation des fours industriels s'est renforcée au fil des ans.

Un des secteurs qui dépendent le plus de l'utilisation de fours industriels est celui du raffinage du pétrole. Ils sont exploités afin de pouvoir chauffer des matières premières comme le pétrole brut pour les raffiner en produits dérivés comme l'essence, le diesel, le kérosène, etc. La mise en œuvre de ses équipements dans le secteur du raffinage du pétrole est indispensable pour créer des produits raffinés de haute qualité et accroître l'efficacité du procédé de raffinage. En outre, ils peuvent réduire les coûts de production en utilisant l'énergie de manière plus efficace, tout en maintenant une production fiable et régulière, en évitant les interruptions ou les pannes majeures. Les industries peuvent ainsi garantir une productivité importante et faire face aux demandes du marché de manière efficace.

Ce chapitre a pour but de fournir une présentation générale des fours industriels. Nous commencerons par décrire les différents types de fours industriels et leurs utilisations dans les industries du raffinage et de la pétrochimie. Nous expliquerons également les critères de sélection des fours, tels que la température requise pour le procédé, le type de produit à chauffer, etc.

Nous aborderons également les paramètres de performance de l'équipement de chauffage, comme le rendement. Enfin, un calcul thermique est utilisé comme méthode pour s'assurer que le four est conçu et exploité dans les meilleures conditions, en veillant à la sécurité et à la fiabilité de ce dernier. Par la suite, un bref aperçu des différents types de polluants qui peuvent être émis durant la combustion dans les fours industriels est présenté.

I.2 Fours industriels : concept de base

Un four [20] est un équipement dont le rôle est de réaliser un chauffage des fluides au moyen des fumées produites par la combustion d'un combustible sous forme liquide ou gazeuse à travers des brûleurs. Il peut être soit : un outil conçu seulement pour le chauffage (cas du chauffage du pétrole brut avant sa distillation) soit d'un véritable réacteur [25] dans lequel les produits sont élaborés (cas du four de vapocraquage pétrochimique).

Dans la chambre de combustion, le combustible est utilisé dans des conditions contrôlées. Les tubes sont disposés sur les parois de la chambre de combustion et la chaleur dégagée se transmet au fluide à travers les parois des tubes. Un four est équipé d'une cheminée qui évacue les produits de la combustion vers l'atmosphère. Il est habituellement installé dans une chaîne de production complexe dont il constitue l'un des éléments.

I.2.1. Différentes classifications des fours industriels

La catégorisation des fours est une tâche difficile à prévoir [20], mais elle permet de regrouper des équipements aux qualités similaires, même s'ils semblent extrêmement différents à première vue. Nous pouvons utiliser une variété de classifications, telles que :

Classification du traitement des produits selon la circulation du produit : des fours continus traitent le produit en continu, contrairement aux fours discontinus qui traitent le produit sous forme de lots.

Les fours peuvent être classés en fonction de leur méthode de chauffage : ils peuvent être chauffés directement ou indirectement.

Classement selon le niveau de température : il existe des fours spécialement adaptés à des températures relativement basses, contrairement à d'autres qui sont capables d'atteindre des températures extrêmement élevées.

Classification par type de combustible : il est possible de faire fonctionner les fours avec différents combustibles, notamment le gaz naturel, le fioul, ou par l'électricité.

I.2.1.1. Four continu ou discontinu

La façon dont le produit est manutentionné et circulé représente ici le principal critère. En effet, dans un four continu connu également en tant que four tunnel ou four à passage, le produit qui doit être chauffé est introduit dans le four à une de ses extrémités et en ressort à

Chapitre I : Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

l'autre. Cela est le cas pour les fours de l'industrie du raffinage ou les fours rotatifs dans l'industrie cimentière

La température d'un four continu est toujours la même en un point du four. Les produits qui doivent être traités (les charges) circulent dans le four en une boucle continue, du chargement au déchargement. Il est considéré comme étant en "état stable" de fonctionnement lorsque la température dans chaque partie du four reste constante dans le temps et dans l'ensemble du four pendant un cycle de traitement donné tandis que le four discontinu, également connu comme four intermittent ou four à charge, le produit qui sera exposé à la chaleur (la charge) est placé de manière fixe et immobile dans le four. De ce fait, il est chargé et déchargé (enfournement et défournement) dans un même lieu. Par conséquent, la température à une position particulière dans le four évolue en fonction du cycle de chauffage qui varie dans le temps. C'est ce que l'on appelle le "régime thermique variable". Cela est le cas comme pour les fours à sole mobile de chauffage pour forge

I.2.1.2. Traitement thermique direct ou indirect

Dans ce cas, c'est le contact qui existe entre les gaz de combustion et les produits à chauffer qui constitue le critère de classification. Les fours à chauffage direct présentent un contact entre les gaz et les produits, susceptible d'entraîner des phénomènes de convection nuisibles à la surface du produit comme par exemple cas de décarburation et d'oxydation dans les fours de réchauffage pour métaux.

Un écran de protection peut être utilisé dans certaines circonstances pour éviter ce contact et rendre le chauffage indirect. Dans les fours à chauffage indirect, le lien entre les gaz de combustion et les produits devient inexistant. En revanche, ceci crée une résistance supplémentaire à la transmission de la chaleur, qui doit se faire par conduction à travers une paroi de protection, puis par convection vers la charge, c'est le cas de notre étude nous avons donc un exemple réel qui représente un four de distillation sous vide à chauffage indirect.

I.2.1.3. Chauffage selon la température

Les fours à haute et à basse température peuvent être classés, bien que cela varie en fonction de l'activité industrielle. Un four à 700°C, par exemple, est considéré comme un four à haute température dans l'industrie chimique, alors qu'il est considéré comme un four à moyenne température dans l'industrie de sidérurgique ou du verre. Les fours à chauffage indirect posent parfois des difficultés de construction lorsque la température est supérieure à

Chapitre I : Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

700-800°C. La transmission de la chaleur a lieu essentiellement par rayonnement à des températures dépassant 1 000 °C par conséquent, il est nécessaire de disposer une paroi de protection capable de résister à ces températures élevées et de protéger les produits à l'intérieur du four. De ce fait, la construction de fours à chauffage indirect est devenue une tâche plus complexe et exige une expertise technique poussée.

1.2.1.4 Types de combustibles : nature de l'énergie fournie

Les fours industriels [20] relèvent d'une classification qui dépend également du type d'énergie utilisé pour le chauffage. Cette énergie a une grande influence sur la conception, l'utilisation et le fonctionnement des fours. De nombreux types de fours industriels sont alimentés par différentes formes d'énergie, à savoir :

- Fours électriques [24] qui fonctionnent avec des résistances « effet joule », des arcs électriques, des électrodes submergées, etc.
- Fours à gaz alimentés en gaz naturel, ou gaz de cokerie, ou gaz de raffinerie, etc.
- Fours à combustible liquide qui sont alimentés par du fioul lourd, du gazole, etc.
- Fours à combustible solide alimentés au charbon, au coke de pétrole ou encore les différents déchets comme dans les fours de cimenterie, les pneus usés sont incinérés.

I.3. Rôle des fours : un élément essentiel dans de nombreux procédés industriels

Les fours à chauffage direct sont souvent utilisés dans les secteurs du raffinage ou de pétrochimie pour fournir l'énergie thermique nécessaire aux différents procédés. L'énergie fournie par la combustion est transmise directement au fluide à chauffer par rayonnement, conduction et convection qui circule dans un faisceau de tubes ou un serpent tubulaire. Cela implique que la source de chaleur est en contact direct avec le fluide chauffé, ce qui permet un transfert de chaleur plus efficace et bien plus rapide. Du fait de sa construction tubulaire, ce type de four est communément appelé "four tubulaire" [21].

En fonction de la chaleur fournie au fluide du procédé, certaines distinctions peuvent être établies [21 ,22] :

- Fours de réchauffage sans modification de l'état physique du fluide : dans certaines circonstances, la charge liquide ou vapeur se déplaçant dans les tubes ne change pas d'état physique et ne reçoit que de la chaleur sensible (l'énergie thermique transmise à un fluide

sans créer de changement d'état physique). Cela signifie que le fluide absorbe de l'énergie sous forme de chaleur tout en restant dans son état physique d'origine (liquide ou gazeux). Par exemple, les unités de reformage catalytique ou d'hydrotraitement des coupes en tête du pétrole brut utilisent ce genre de four pour chauffer les fluides, ce qui permet de transmettre de la chaleur sensible sans affecter l'état physique de la charge.

- Fours de réchauffage avec changement d'état du liquide (vaporisation partielle) : La charge (liquide) placée dans un four de réchauffage de liquides à vaporisation partielle reçoit de la chaleur latente pour acquérir le degré de vaporisation approprié. Cela signifie que le liquide reçoit la quantité de chaleur nécessaire pour se vaporiser partiellement, sans être converti en vapeur entièrement saturée. Cela peut être nécessaire pour garder une partie de la charge sous forme liquide en vue d'un traitement ultérieur.

Si la vaporisation est complète, elle risque d'entraîner une surchauffe et la formation de dépôts dans le four. La vaporisation partielle peut donc être utilisée pour contrôler la température et limiter ces problèmes. Elle permet également de récupérer certains composants volatils du liquide, ce qui peut être avantageux dans certaines applications. En effet, ce type de four est utilisé dans les unités de distillation atmosphérique du pétrole brut ou dans les fours de rebouillage.

- Les fours de chauffage de fluide en présence d'une réaction chimique [25] sont utilisés dans les unités de craquage thermique, où la charge est portée à une température élevée (température de réaction) afin de séparer les molécules pour obtenir des produits légers et mieux utilisables. Le produit reste à cette température pendant un certain temps dans une zone spéciale dite soaking ou la zone de traitement isotherme ou de maturation, qui permet aux calories transmises de compenser celles absorbées par la réaction. Ces fours se comportent comme des réacteurs chimiques, il se peut que la réaction se fasse en présence d'un catalyseur placé dans les mêmes tubes du four, il s'agit ici de fours un peu spéciaux qui ne sont pas du ressort de notre étude.

I.4. Critères à prendre en considération afin de choisir un four industriel

Lorsque la conception d'un processus industriel est en cours, il est essentiel d'opter pour le choix d'un four. Une application inefficace ou incorrecte d'un four peut engendrer des dépenses excessives en termes de temps, d'énergie et de maintenance. Par conséquent, il est

Chapitre I : Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

indispensable de prendre en compte de nombreux critères pour choisir le four mieux adapté à un processus spécifique. Parmi les principales exigences [22], notons les suivantes :

- ✓ Le type de traitement à effectuer : le type de processus à exécuter est un élément important à prendre en considération lors de la sélection d'un four. En effet, la température, la durée du traitement, la quantité et la nature de la charge ainsi que les besoins en matière de contrôle de la température varient d'une opération à l'autre.
- ✓ La contenance : Le four doit avoir la capacité de traiter la quantité de charge requise par le processus. Un manque de capacité risque d'entraîner des arrêts fréquents, tandis qu'une surcapacité peut se traduire par une perte d'énergie et des coûts exorbitants.
- ✓ Conditions de fonctionnement : Les paramètres de température, de pression, de débit et de composition des gaz, ainsi que le taux de vaporisation, doivent être pris en compte tout au long de l'opération afin que le processus soit sécurisé et efficace en citant l'exemple de la température de fonctionnement : Certains fours sont incapables de supporter des températures élevées, mais d'autres sont conçus pour supporter des températures extrêmement élevées.
- ✓ La flexibilité requise : La flexibilité des fours est essentielle pour les futures modifications et adaptations des processus.
- ✓ Type et caractéristiques chimiques du fluide à chauffer : Le choix d'un four peut être influencé par le type de fluide à chauffer. En effet, selon leur nature, certains fluides risquent d'être corrosifs et nécessitent un revêtement particulier (matériaux de tuyauterie résistant à la corrosion), tandis que d'autres exigent une température de chauffage bien précise afin qu'une réaction chimique ait lieu.
- ✓ Nature de l'écoulement des fluides : plusieurs formes d'écoulement peuvent être envisagées en fonction de la viscosité du fluide. Dans le cas des fluides visqueux, un écoulement laminaire peut être souhaité pour ne pas créer de pertes de charge et de turbulences, qui pourrait limiter l'efficacité du chauffage. En revanche, un écoulement turbulent peut être plus efficace pour assurer un transfert de chaleur optimal pour les fluides à faible viscosité.
- ✓ Le type de combustible utilisé est aussi un autre facteur important dont il faut tenir compte. Le gaz naturel, le charbon ou d'autres sources d'énergie sont autant de combustibles possibles. De nombreux facteurs influencent le choix du combustible, notamment la disponibilité et le coût de la source d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre, la

Chapitre I : Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

réglementation locale et les préoccupations environnementales. Le gaz naturel, par exemple, est souvent préféré car il est moins polluant et plus efficace que les autres sources d'énergie ; cependant, il est parfois plus coûteux dans certaines régions.

- ✓ Choix des matériaux de construction : Il est nécessaire de choisir les matériaux de construction conformément aux paramètres de fonctionnement et à la composition de la charge. Ils doivent être résistants à la corrosion, à l'abrasion, à la chaleur et aux contraintes mécaniques.
- ✓ Le rendement énergétique est une demande prioritaire des entreprises qui tentent d'économiser sur les coûts d'exploitation. Les fours peuvent être rendus plus efficaces sur le plan énergétique grâce à l'intégration d'un système de récupération de la chaleur et une isolation thermique efficaces.
- ✓ La maintenance est un autre facteur important à prendre en compte. Certains fours nécessitent un suivi régulier pour assurer leurs performances et leur durabilité, tandis que d'autres sont construits pour être plus résistants et ne demandent que peu d'entretien.
- ✓ Emplacement disponible dans l'unité : Il est essentiel que les dimensions des fours soient prises en compte et qu'elles soient adaptées à l'espace disponible dans l'unité. Il convient également de tenir compte des accès à la maintenance et à l'installation, de même que les exigences en matière de sécurité et de réglementation relatives à la mise en place de l'équipement dans le site.
- ✓ Coût d'exploitation et coût d'investissement : le coût d'investissement du four couvre le prix initial d'achat de même que les coûts de construction et les frais d'installation, tandis que le coût d'exploitation correspond aux charges relatives à la mise en œuvre du four, comme les frais de combustible, les frais d'entretien et les frais de réparation. Il est essentiel de maintenir un équilibre entre les dépenses d'investissement et les dépenses d'exploitation. Un four à bas prix, par exemple, risque d'avoir des coûts d'exploitation plus élevés du fait d'une efficacité énergétique moindre, ce qui se traduira par des dépenses totales plus importantes au fil du temps. Par conséquent, lors du choix d'un four, il est essentiel de considérer ces deux coûts dans le but d'identifier la meilleure solution en termes de rentabilité et de durabilité.

Ces critères étant pris en considération, il est possible de déterminer le four le mieux adapté à un procédé donné.

I.5. Caractéristiques d'un four tubulaire classique

Un four tubulaire [21,22] est un équipement composé d'une structure métallique de différentes géométries, généralement parallélépipédique ou cylindrique (voir figure 1.1). Il est constitué de :

- Une zone dite de radiation, dans laquelle les tubes sont confrontés directement à la flamme et acquièrent de la chaleur essentiellement par radiation provenant des produits de la combustion (fumées). La chambre de combustion est marquée par la zone de rayonnement où se développe la flamme ; les tubes sont généralement disposés le long des parois de cette zone, le plus souvent en une seule rangée, voire en deux rangées [23].
- Une zone de convection, dans le cas où elle existe, est située à la sortie des fumées de la chambre de combustion. Elle se compose d'une série de tubes disposés en quinconce, de façon perpendiculaire ou parallèle à la direction des fumées, et ses surfaces extérieures sont parfois revêtues d'ailettes, ce qui augmente de manière significative la surface d'échange.
- Un outil de chauffage composé de brûleurs placés en bas ou sur les côtés de la chambre de combustion, qui ont pour rôle d'assurer le mélange intime de l'air et du combustible de manière à ce que la combustion soit complète. En raison de la dépression dans le four, l'air nécessaire à la combustion est amené par des volets d'air réglables.
- Le revêtement métallique du four devrait être suffisamment résistant à l'action du vent et capable de porter efficacement l'ensemble du faisceau de tubes.
- Un garnissage réfractaire et isolant protège les parois internes des effets de la température, dans le but de limiter les pertes de chaleur vers l'extérieur.
- Un registre permettant de contrôler le débit d'air peut être installé dans une cheminée ou un carneau ce registre doit être fabriqué en acier résistant à la température des gaz. La cheminée a pour fonction de diriger les gaz dans l'environnement à une hauteur telle qu'ils ne gênent pas la zone environnante, ce qui est particulièrement important dans les installations très étroites. Toutefois, étant donné que le tirage de la cheminée provoque une dépression dans la chambre de combustion, laissant entrer l'air requis pour la combustion par les volets d'air des brûleurs, il est indispensable que les dimensions de la cheminée, hauteur et diamètre, soient calculées de manière à obtenir ce tirage.
- Éléments auxiliaires :

- a) Quand le combustible utilisé dans un four est liquide, il arrive que les produits de la combustion créent des dépôts de suie au niveau des tubes de convection du four. La formation de ces dépôts risque de limiter l'efficacité de la récupération de chaleur à partir des fumées de combustion, car ils font office de barrière thermique, qui limite la transmission de la chaleur provenant des fumées vers les tubes de convection. Des souffleurs de suie, également connus sous le nom de ramoneurs, parviennent à éliminer ces dépôts de suie en les installant dans le four. Les souffleurs de suie emploient un jet de vapeur pour retirer les dépôts de suie des tubes, ce qui augmente l'efficacité de la récupération de la chaleur des fumées et contribue au maintien d'un rendement énergétique élevé.
- b) Les opacimètres sont des appareils qui servent à mesurer le degré d'opacité des fumées émises par les cheminées des fours. Ils représentent la teneur en particules solides non brûlées (imbrûlées) des fumées. Ces particules sont d'autant plus concentrées que l'opacité est importante, laissant présager que la combustion est inefficace ou incomplète. Pour garantir le respect des réglementations en matière de qualité de l'air, les opacimètres sont fréquemment mis à profit pour détecter la présence des particules en suspension dans l'air.
- c) Les analyseurs d'oxygène (ou oxygénomètres) sont des compléments indispensables aux fours industriels. Ces instruments servent à déterminer la teneur en oxygène des gaz de combustion et, par conséquent, à juger de l'efficacité de la combustion. En fait, une concentration élevée en oxygène indique qu'il y a un excès d'air qui est inutile à la combustion et qui n'est pas utilisé de la façon la plus optimale du point de vue de la chaleur du fluide. L'efficacité énergétique du four peut être améliorée en se débarrassant de cet air excédentaire.
- d) Un déprimomètre est un appareil utilisé pour mesurer la dépression ou le vide dans une cheminée ou un conduit de fumée. Une telle mesure est essentielle car elle permet de savoir si le tirage de la cheminée est suffisamment important pour permettre l'évacuation des gaz de combustion. En cas de tirage insuffisant, les gaz risquent de rester stagnants dans le conduit, ce qui pose à la fois des problèmes de sécurité et de performance. Le déprimomètre est donc un instrument essentiel pour le fonctionnement optimal du four et la prévention des incendies.

- e) Il existe d'autres connexions divers, tels que les portes d'accès, les portes anti-souffle et les trous d'homme, pour assurer la sécurité, l'entretien et le fonctionnement du four. Les portes d'accès sont utilisées pour faciliter l'accès aux différentes parties du four à des fins d'entretien, de nettoyage ou de remplacement des pièces. Les portes de soufflage sont des dispositifs de sécurité qui libèrent la pression dans le four en cas d'explosion ou de surpression. Les trous d'homme (portes d'observation) facilitent l'inspection et la surveillance de l'intérieur du four.
- Des systèmes de récupération de chaleur, extrêmement avantageux du point de vue de l'énergie et du rendement thermique, peuvent également être installés dans les fours. Lorsque les fumées sont évacuées vers l'extérieur par la cheminée, la température de sortie peut demeurer importante. Dans le but de réduire la consommation d'énergie, une récupération de l'énergie thermique contenue dans les fumées avant qu'elles ne soient rejetées dans l'atmosphère s'avère donc intéressante. Cette récupération de chaleur est réalisée dans des équipements complémentaires positionnés sur le circuit des fumées, qui peuvent être utilisés soit comme préchauffeur de l'air de combustion principalement utilisé dans les fours industriels de sidérurgie. Ou soit pour réchauffer un fluide (vapeur, eau chaude ou fluide caloporteur) non lié au procédé du four : cette pratique de chauffage d'un fluide externe apparaît le plus souvent, par exemple, dans les fours du raffinage et de l'industrie chimique. Cette récupération de chaleur peut aller jusqu'à 5 à 20 % de l'énergie contenue dans le combustible d'origine [20,21].

Le système de récupération de chaleur en continu est considéré comme un exemple de système de récupération de chaleur, caractérisé par un écoulement continu du fluide à l'intérieur d'une même direction afin de maintenir un régime thermique permanent. Vu que le coefficient de transfert de chaleur entre deux fluides gazeux est faible, le système est composé d'un grand nombre de tubes ou de plaques afin d'améliorer la surface d'échange. Les fluides peuvent circuler en parallèle, à contre-courant ou à contre-courant, tout comme le système peut être statique (fixe) ou mobile. La figure I.2 présente un récupérateur continu.

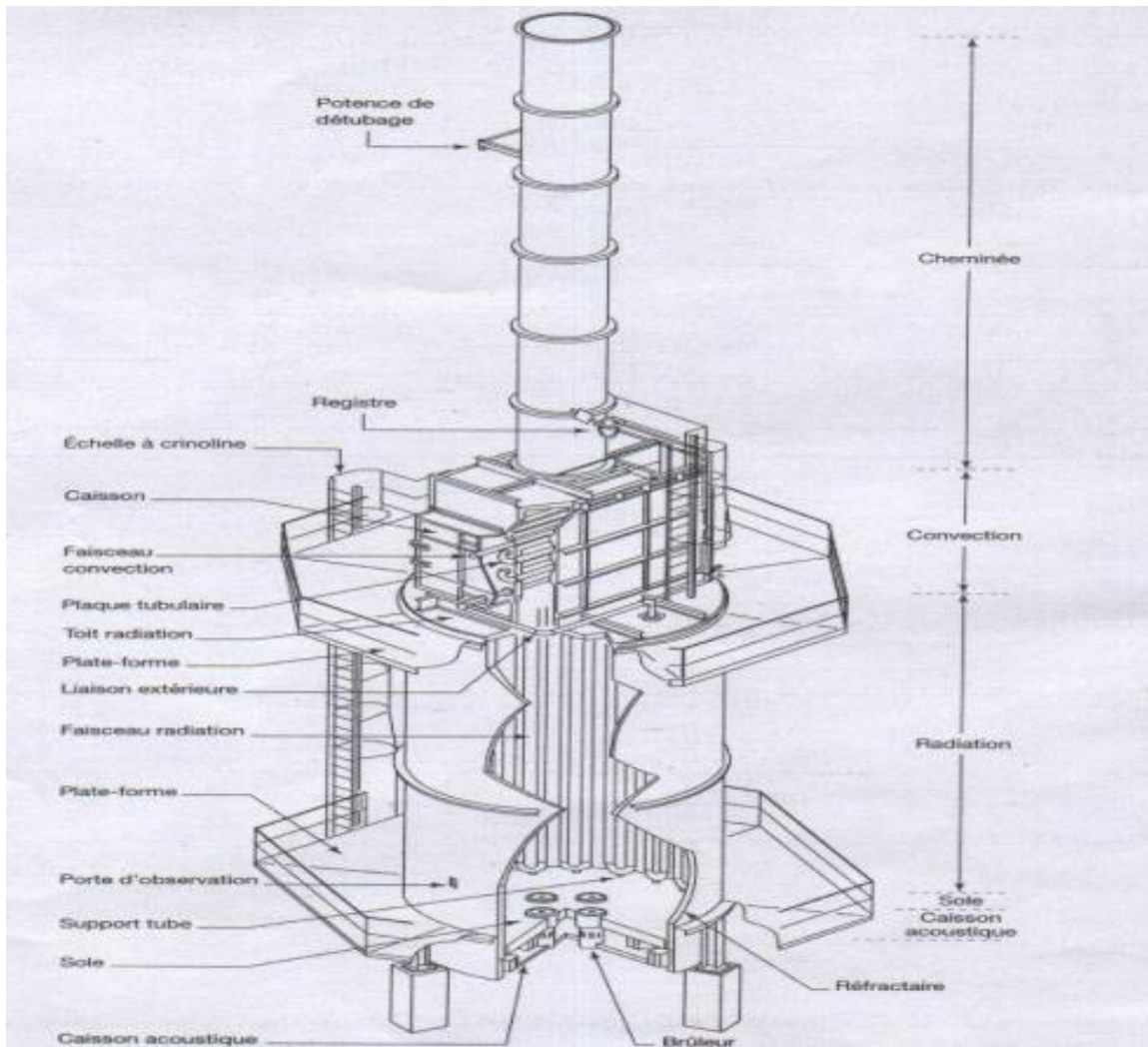


Figure I.1. Vue schématique de la structure d'un four, exemple de four cylindrique vertical [22]

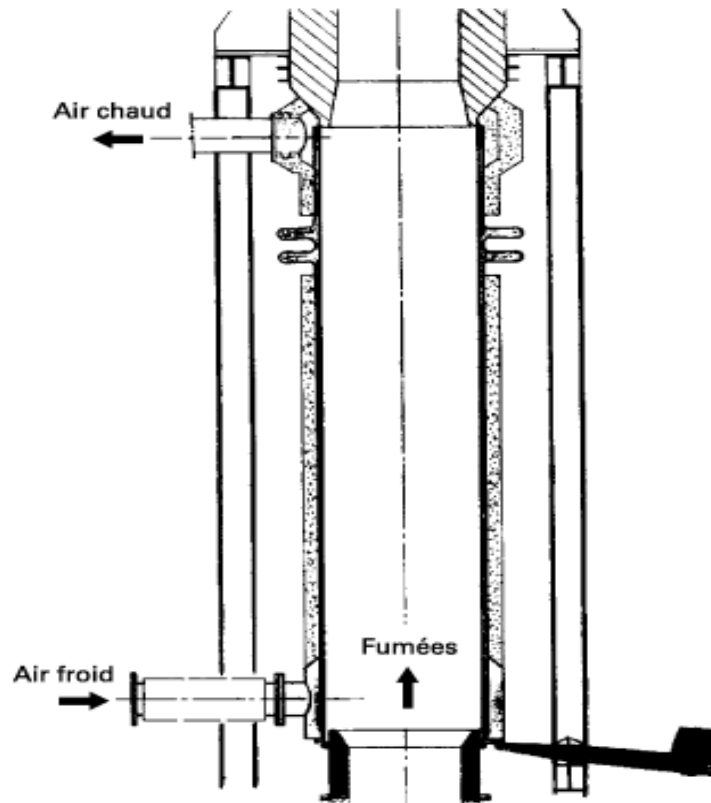


Figure I.2. Exemple de récupérateur continu [20]

I.5.1. Principaux types de fours

Les fours tubulaires [26] sont catégorisés selon leur géométrie, qui comprend la structure de l'enceinte de chauffe et de la chambre de combustion. Cette géométrie peut modifier les performances du four en matière de transfert de chaleur, d'homogénéité de la température et de durée de séjour du produit.

I.5.1.1. Fours cylindriques

❖ Fours à tubes verticaux

La zone de rayonnement (chambre de combustion) se présente sous la forme d'un cylindre à axe vertical. Les tubes sont placés dans la plupart des cas sur la circonférence de la paroi intérieure. Les brûleurs sont disposés sur la sole du four. La surface d'échange couvre les parois verticales et présente donc une symétrie circulaire par rapport à l'unité de chauffage. La zone de convection au-dessus de la chambre est constituée de tubes verticaux disposés directement dans la cheminée, ou de tubes verticaux. Ce type de four convient à la fois à la combustion du fuel et du gaz et est adapté aux faibles et grandes capacités de production.

❖ Fours à faisceau hélicoïdal

Ils sont constitués d'un assemblage de tubes hélicoïdaux organisés suivant un axe vertical. Les gaz de combustion passent librement par les tubes hélicoïdaux et transmettent la chaleur aux produits contenus à l'intérieur de ces tubes. Les brûleurs sont disposés sur la sole du four, la zone de convection est construite au-dessus de la chambre de combustion. La figure I.3 présente les différents types de fours cylindriques.

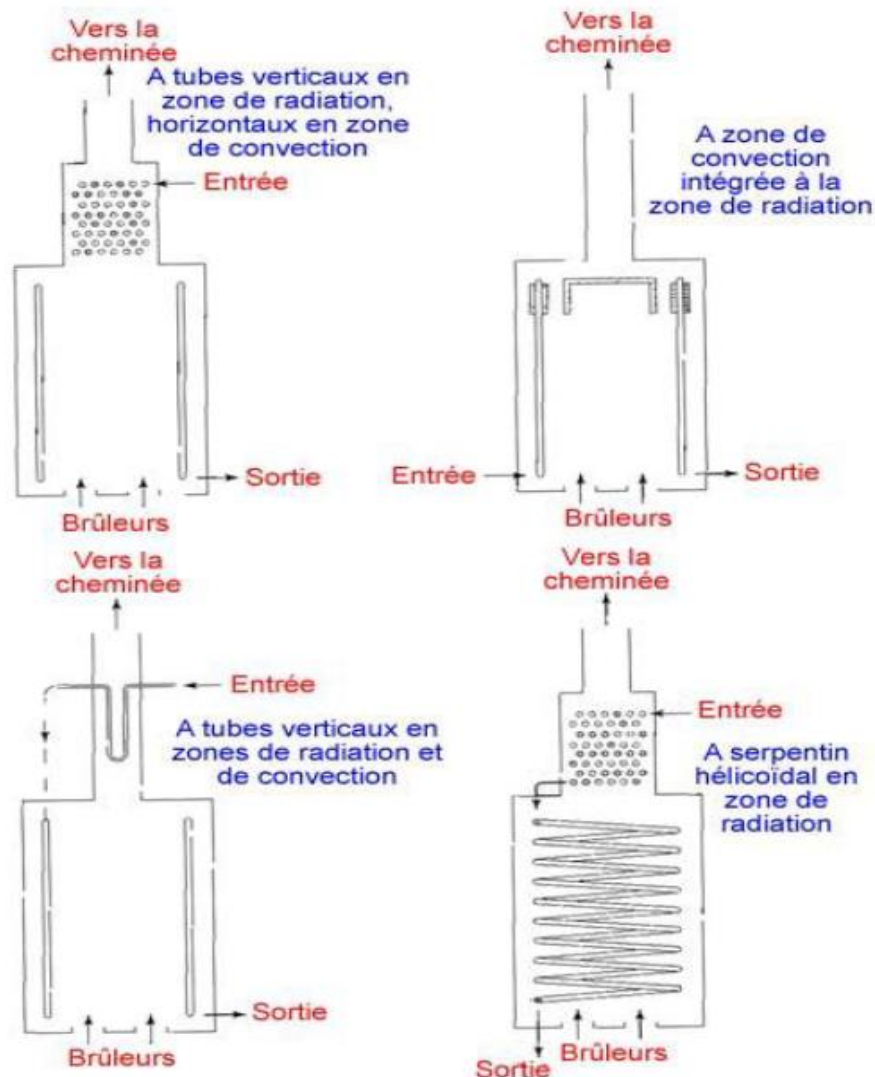


Figure I.3. Différents types du four cylindrique [26]

I.5.1.2. Fours cabines

Les fours à tubes horizontaux se distinguent par une zone de rayonnement parallélépipédique d'une longueur horizontale maximale. Les tubes sont alignés horizontalement sur les parois latérales qui sont les plus longues. Les brûleurs sont placés sur

la sole, ou plus précisément sur une partie inférieure des parois latérales les plus longs, ou encore sur les parois d'extrémité qui ne possèdent pas de tubes [26].



Figure I.4. Four cabine [26]

Il faut souligner qu'il existe encore d'autres types de fours, y compris des fours spéciaux conçus pour des usages spécifiques ; néanmoins, nous avons présenté les types les plus répandus et les plus pertinents dans le cadre de notre étude, afin d'assurer une intelligibilité et une vision cohérente de l'ensemble de notre sujet

I.5.2. Systèmes de tirage pour une combustion efficace et sûr

Le tirage est l'énergie flottante générée lorsque les gaz de combustion remontent dans un four. Il s'agit d'un flux ascendant de gaz chauds causé par une différence de température et de densité entre l'air chaud à l'intérieur du four et l'air froid à l'extérieur. Cette différence de densité entraîne une différence de pression qui crée un écoulement d'air connu sous le nom de tirage. L'air chaud se déplace vers le haut parce qu'il est moins dense que l'air froid. la figure I.5 présente les quatre types de systèmes de tirage

- Tirage naturel : l'écoulement naturel vers le haut des gaz chauffés assure le tirage d'un four à tirage naturel. Pour remplacer les gaz de combustion qui sortent de la cheminée, de l'air froid est envoyé vers les brûleurs, en ajustant la position du registre dans la

Chapitre I : Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

cheminée. Le réglage de la position du registre dans la cheminée permet de contrôler le tirage.

- Tirage forcé : le ventilateur alimente les brûleurs en air de combustion. Au moyen d'un tirage forcé on peut contrôler l'alimentation en air des brûleurs.
- Tirage induit : Le tirage induit a lieu en évacuant les gaz de combustion du four à l'aide d'un ventilateur placé entre la partie convection et la cheminée.
- Tirage équilibré : un four à tirage équilibré est équipé de deux ventilateurs. Le premier alimente les brûleurs en air, tandis que le second évacue les gaz de combustion du four.

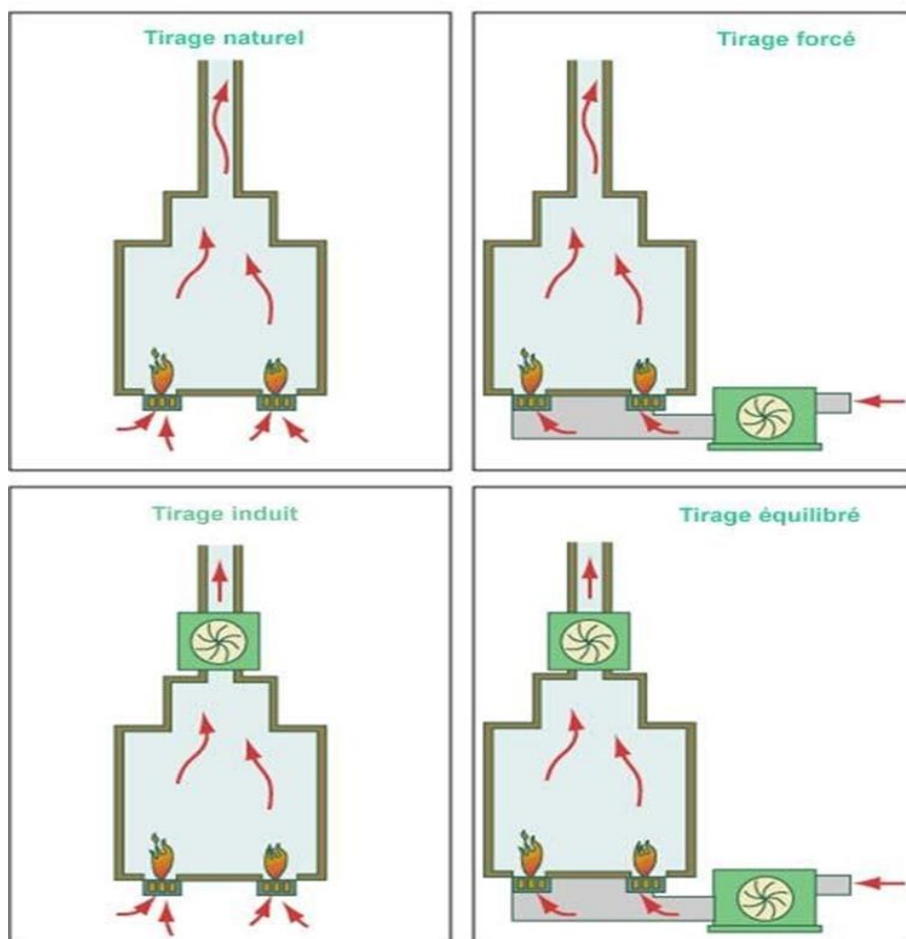


Figure I.5. Types de systèmes de tirage

I.5.3. Dépannage du four

Le dépannage d'un four est la recherche et la résolution des problèmes qui surviennent au cours du fonctionnement du four. Ces problèmes peuvent être dus à la combustion, au contrôle de la température, à la mauvaise qualité du produit ou à des fuites d'air ou de gaz. Les employés chargés de l'entretien de l'usine ou les techniciens spécialisés peuvent procéder au dépannage. Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire d'arrêter le four, de remplacer des pièces ou de procéder à une mise à jour du logiciel de contrôle. Le but du dépannage est de garder le four dans un état de fonctionnement correct de manière à assurer une efficacité énergétique et une production optimale. Parmi les facteurs qui peuvent causer des problèmes, notons les suivants :

I.5.3.1. Choc de flamme

Le choc de flamme apparaît quand une flamme vient en contact avec un élément du four (le plus souvent un tube), entraînant des températures trop élevées qui génèrent des dépôts de coke dans les tubes. La figure I.6 ci-dessous représente la formation du coke à l'intérieur de tube.

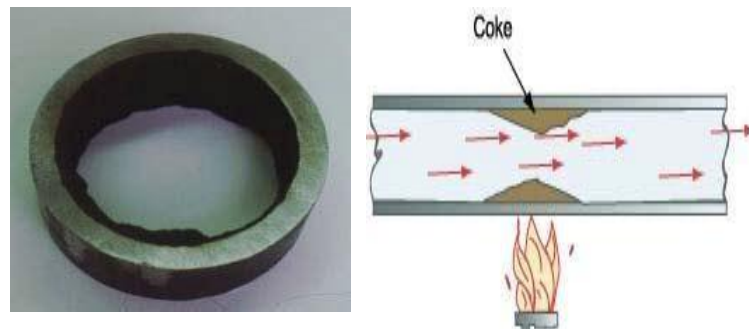


Figure I.6. Dépôt de coke à l'intérieur de tube

I.5.3.2. Points chauds

Un point chaud est une partie surchauffée du four. La surchauffe du four peut être causée par un choc de flamme ou par une distribution inefficace de la chaleur. Les points chauds posent problème en raison du dépôt de coke dans les tubes susceptibles d'affaiblir les structures métalliques.

Elles peuvent parfois être visuellement détectées en raison de l'apparition sous forme de point rougeoyant sur le métal. Il est également possible de détecter les zones chaudes à l'aide d'un thermomètre optique spécifique appelé "pyromètre", qui mesure la température du métal.

I.5.3.3. Cokage et décokage

La formation de dépôts dans les tubes est appelée cokéfaction. Le coke agissant comme un isolant, il empêche le transfert de chaleur vers le flux de procédé. De plus, il réduit le débit d'écoulement, diminuant ainsi la quantité de chaleur transportée par le flux de procédé. Lorsque la quantité de chaleur transférée et transportée par le flux est insuffisante, la chaleur s'accumule dans le métal des tubes, ce qui est généralement considéré comme un point chaud.

Une autre méthode de détection du cokage consiste à suivre la température des parois du tube. Les tubes peuvent finir par se rompre si le problème de cokéfaction n'est pas résolu. Il est possible d'injecter de la vapeur et de l'air surchauffés dans les tubes d'un four pour le décokéfier. En brûlant le coke, cette procédure permet également de nettoyer les tubes. Le flux du procédé doit être arrêté avant que les tubes puissent être décokés.

I.5.3.4. Soufflage de suie

Les cendres produites lors de la combustion dans les fours recouvrent l'extérieur des tubes et peuvent entraver le transfert de chaleur. Les souffleurs de suie qui accompagnent généralement les fours à pétrole sont utilisés pour éliminer ces dépôts. Les dépôts de cendres sont éliminés par le ramoneur à l'aide de vapeur. L'opération peut être effectuée sans arrêter le four, car le soufflage de suie ne perturbe pas les flux de combustible ou de procédé.

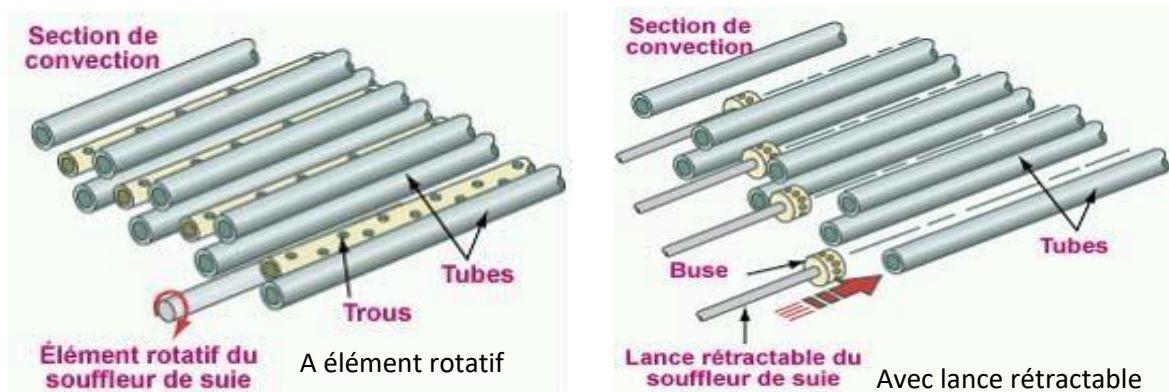


Figure I.7. Souffleur de suie

I.6. Modes de transfert de chaleur dans un four

Le transfert de la chaleur est essentiel dans les opérations de traitement thermique dans un four. Par conséquent, il est crucial de bien connaître les concepts de base de la thermodynamique qui régissent les différentes formes de transfert de chaleur. Il existe trois

modes essentiels à savoir : la conduction, la convection et le rayonnement. La compréhension de ces modes est essentielle pour l'amélioration de tout processus de traitement thermique, car chaque mode occupe un rôle particulier dans le transfert de la chaleur.

I.6.1. Transfert de chaleur par conduction

Tous les transferts de chaleur qui se produisent dans les parois séparant deux corps à des températures différentes sont caractérisés par un transfert de chaleur par conduction. La chaleur est alors transférée par le contact direct des particules environnantes dans un milieu dont la température n'est pas uniformément répartie. La différence de température entre le côté chaud et le côté froid et la conductivité thermique (k) du matériau jouent sur la vitesse à laquelle la chaleur est transmise. Chaque matériau a sa propre conductivité, qui varie quelque peu en fonction de la température. Un matériau ayant une conductivité thermique élevée doit être utilisée pour transférer la chaleur. En revanche, un matériau à faible conductivité thermique doit être choisi s'il est important d'éviter les pertes de chaleur. L'équation suivante permet de calculer la chaleur transmise par conduction :

$$Q_{conduction} = \frac{k S (T_0 - T_1)}{e} \quad (I-1)$$

Où :

k : Conductivité thermique du matériau ($J.m / K^\circ$)

S : Surface d'échange (m^2)

T_0, T_1 : Température correspond au paroi externe et interne de tube (K°)

e : L'épaisseur entre paroi interne et externe de tube (m)

I.6.2. Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection fait intervenir le mouvement des fluides (gaz ou liquides). Le mouvement crée une agitation qui permet l'échange de chaleur entre le fluide et une paroi, ainsi qu'une diffusion plus aisée à l'intérieur du fluide. Ce dernier agit comme un véhicule thermique pendant le transfert de chaleur par convection. Lorsque le mouvement du fluide est causé par des changements de la masse volumique présente dans celui-ci à la suite de différences de température, la convection est dite naturelle ou libre. La convection est dite forcée lorsqu'elle est générée par une machine, telle qu'un compresseur ou un ventilateur, etc. L'équation donnée ci-dessous permet de déterminer la quantité de chaleur transmise par convection :

$$Q_{convection} = h_c S_t (T_g - T_t) \quad (I-2)$$

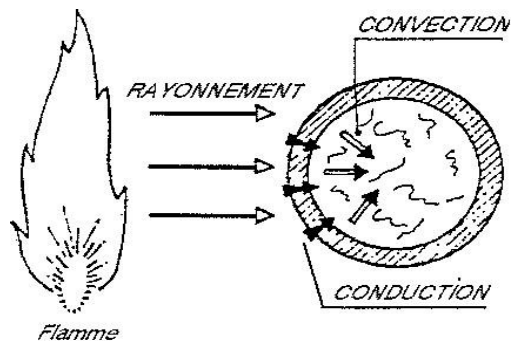
I.6.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Lorsque la chaleur est transférée par rayonnement, l'énergie thermique est déplacée sous forme d'ondes électromagnétiques similaires à celles de la lumière. En effet, tout corps, y compris placé dans le vide, génère de l'énergie thermique sous forme de rayonnement qui peut se propager sans le support d'aucun matériau. Ce rayonnement est accru en raison de la température élevée du corps qui l'émet. Cependant, il n'apparaît qu'à partir de 700 et 800°C. Dans la conception et le fonctionnement des équipements d'échange de chaleur, la quantité de chaleur transportée par rayonnement devient insignifiante à des températures plus basses. L'équation utilisée pour déterminer le transfert de chaleur par rayonnement est la suivante :

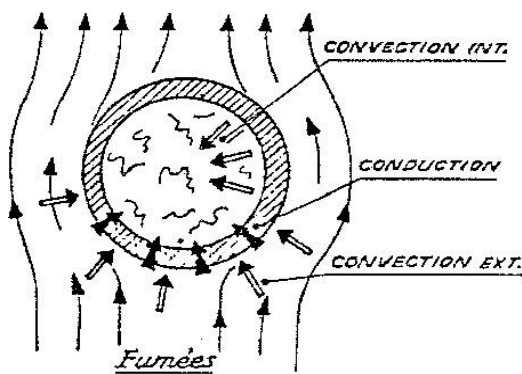
$$Q_{radiation} = \sigma F \alpha A_{cp} (T_g^4 - T_t^4) \quad (I-3)$$

Dans la pratique des procédés industriels, la nécessité de mettre en œuvre des échanges de chaleur fait appel simultanément aux différents modes de transmission de la chaleur. Dans le cas d'un tube situé dans la zone de rayonnement d'un four, les 3 modes de transmission sont combinés :

- ✓ Les gaz de combustion émettent de la chaleur vers la paroi extérieure du tube par rayonnement et convection.
- ✓ La chaleur est alors transmise à travers le tube par conduction ensuite par convection vers le fluide



Pour un tube placé dans la zone de convection et non exposé à la flamme, les modes de transmission suivants sont observés :



- ✓ Transfert de chaleur des gaz de combustion (à haute température) par convection vers la paroi extérieure du tube.
- ✓ Par conduction à travers l'épaisseur du tube
- ✓ Puis, par convection, de la paroi intérieure du tube vers le fluide.

I.7. Paramètres de performance

Les paramètres utilisés pour évaluer les performances des équipements comprennent l'efficacité, la qualité de la quantité de chaleur absorbée, la fiabilité et le coût. Ces indicateurs diffèrent selon le type d'équipement, le domaine d'application et les exigences particulières de l'utilisateur. Cette étude se concentre sur les paramètres de performance des équipements tels que le rendement thermique, la quantité de chaleur absorbée par le fluide circulant dans les tubes et le coefficient d'échange thermique convectif (h). Ces facteurs peuvent apporter des informations sur la qualité du fonctionnement des équipements, en particulier des équipements de chauffage tels que les fours, les chaudières et les échangeurs de chaleur. Ces indicateurs peuvent être déterminés en fonction des caractéristiques du fluide et des conditions de fonctionnement (pression, température et débit...etc.) à l'aide d'équations de bilan thermique. De nombreux chercheurs ont utilisé le calcul thermique, notamment Ghasemkhani et al. (2016), pour évaluer l'effet de modification de la température de l'air expérimental et de la vitesse de rotation sur les paramètres de performance de l'équipement et sur la qualité du produit séché [31]. En outre, Universiti Malaysia Pahan et al. (2014) ont réalisé une étude pour déterminer le rendement pendant le transfert de chaleur par convection forcée en régime laminaire [32]. Selon une autre démarche, Chunsheng et al. (2019) ont étudié l'impact du paramètre de la température du gaz combustible sur l'efficacité thermique du four [33]. De même, Wang et al. (2017) ont étudié l'impact de la distribution de la température sur le rendement thermique du four, en tenant compte des propriétés thermiques du brome, de la position du brûleur et de la nature du flux de gaz [34].

I.7.1. Rendement η

Le rendement [30] est défini comme une mesure de la quantité de chaleur absorbé par le fluide réchauffé et celle dégagée par la combustion. Il est susceptible d'être affecté par plusieurs facteurs. Citons notamment les suivants :

I.7.1.1. Pertes par les parois

En effet, il existe une partie, souvent négligeable, de la chaleur non-absorbée ($Q_{conduction}$) est perdue à travers les parois du tube du four par conduction.

Les pertes du four à travers ses parois (Q_{paroi}) sont dues également à des imperfections de l'isolation thermique des matériaux réfractaires. Elles représentent 1 à 2 % de la chaleur

émise par les brûleurs des fours récents de grande puissance thermique. Elles peuvent être encore plus importantes si les fours sont anciens et que le réfractaire est endommagé.

I.7.1.2. Pertes par les fumées

Le plus important est la perte au niveau de la cheminée, évacuée dans l'atmosphère par les fumées qui sortent du four à une température encore assez élevée.

La chaleur dégagée par les brûleurs représente généralement entre 5 et 20 % de la perte de chaleur par les fumées ($Q_{fumées}$) qui sont évacuées vers l'extérieur. La quantité d'air de combustion excédentaire ("excès d'air") et la température des fumées sont les deux facteurs déterminants de ces pertes par les fumées.

La combustion complète nécessite l'ajout dans le four d'une quantité d'air supérieure à celle absolument indispensable à la combustion (qui peut être défini sous forme de pourcentage).

Il est essentiel de comprendre le concept d'excès d'air. En effet, lors de son passage dans le four, l'air excédentaire qui est inutile à la combustion est réchauffé à la température des fumées, ce qui entraîne une perte supplémentaire.

Un réglage correct de la combustion peut agir sur ce facteur, et même avec des brûleurs bien conçus, il n'est pas possible de descendre en dessous d'une certaine valeur limite, en raison du risque de combustion incomplète, qui présente les inconvénients suivants :

- ✓ Une diminution de la quantité de chaleur dégagée par unité de poids de combustible utilisé, ce qui réduit le rendement.
- ✓ Production de monoxyde de carbone, qui peut interagir avec l'oxygène pour générer du CO et provoquer une réaction de post-combustion susceptible d'endommager le four.

La figure I.8 ci-dessous offre une représentation du bilan thermique d'un four. Par conséquent, le bilan thermique du four s'exprime comme suit :

$$Q_{entrée} = Q_{absorbée} + Q_{paroi} + Q_{fumées} \quad (I-4)$$

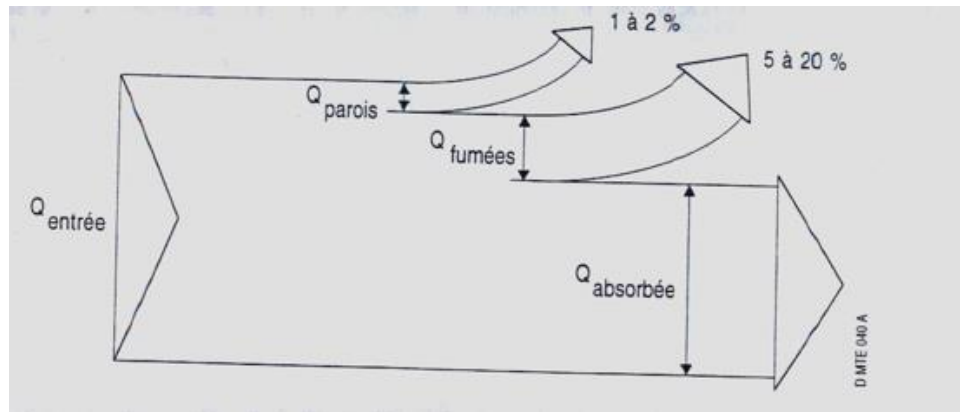


Figure I.8. Bilan thermique du four

Le rendement d'un four peut être déterminé par deux méthodes de calcul à l'aide de bilans thermiques. La première méthode est basée sur le calcul des pertes de chaleur à travers les parois et les fumées. Par contre, la deuxième méthode est issue d'un calcul thermique de Lobo Evans qui fait appel aux modes de transfert de chaleur par rayonnement et par convection, en tenant compte de la forme géométrique et des dimensions du four.

Le rendement d'un four est décrit comme suit :

$$\eta = \frac{\text{Quantité de chaleur absorbé par le fluide}}{\text{Quantité de chaleur fourni par la combustion}} \times 100 \quad (\text{I-5})$$

I.7.1.3 Détermination du rendement d'un four sur la base des pertes de chaleur à travers les parois et les fumées

En utilisant le bilan thermique, la quantité de chaleur absorbée par le fluide s'exprime comme suit :

$$Q_{\text{absorbée}} = Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{paroi}} - Q_{\text{fumées}} \quad (\text{I-6})$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{paroi}} - Q_{\text{fumées}}}{Q_{\text{entrée}}} \quad (\text{I-7})$$

Où :

$Q_{\text{entrée}}$: Quantité de chaleur dégagée par la combustion ($kcal/h$).

Q_{paroi} : Pertes de chaleur à travers la paroi réfractaire ($kcal/h$).

$Q_{\text{fumées}}$: Pertes de chaleur par les fumées ($kcal/h$).

Pour calculer le rendement, plusieurs calculs préliminaires doivent être effectués :

- ✓ Quantité de chaleur fourni par la combustion $Q_{\text{entrée}}$

Chapitre I : Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

En effet, l'air et le combustible, qui sont les deux éléments principaux du mélange comburant, sont tous deux présents dans la chaleur générée à l'entrée du four. Lorsque l'air est utilisé comme oxydant pendant la combustion, il se mélange au combustible pour dégager de l'énergie sous forme de chaleur. Par conséquent, la quantité de combustible et d'air qui entre dans le four, ainsi que leur composition et leur température, ont une incidence directe sur la quantité de chaleur absorbée par le fluide de travail dans le four. Ces facteurs doivent donc être pris en considération afin de déterminer le rendement du four. L'équation est présentée comme suit :

$$Q_{\text{entrée}} = Q_1 + Q_2 \quad (\text{I-8})$$

Q_1 : Quantité de chaleur dégagée par le combustible ($kcal/h$).

Q_2 : Quantité de chaleur dégagée par l'air ($kcal/h$).

Afin de pouvoir calculer la quantité de chaleur fournie par le combustible Q_1 , il est nécessaire de connaître sa composition, son pouvoir calorifique et son débit massique ou volumique.

$$Q_1 = f_{\text{combustible}} \times PCI \quad (\text{I-9})$$

Avec :

$$PCI = \sum PCI_i \times Y_i \quad (\text{I-10})$$

PCI_i : Pouvoir calorifique inférieur des différents constituants du gaz combustible ($kcal/Nm^3$).

Y_i : Pourcentage molaire des différents constituants du gaz combustible.

$f_{\text{combustible}}$: Débit volumique du fuel gaz (Nm^3/h).

L'équation de la quantité de chaleur dégagée par l'air Q_2 est donnée par la formule suivante :

$$Q_2 = f_{\text{air}} \times Cp_{\text{air}} \times T_{\text{air}} \quad (\text{I-11})$$

f_{air} : Débit d'air de combustion (Nm^3/h).

Cp_{air} : Chaleur spécifique de l'air ($kcal/Nm^3 \cdot C^\circ$).

T_{air} : Température d'entrée d'air (C°).

✓ Pertes de chaleur à travers la paroi réfractaire Q_{paroi}

En admettant que la perte de chaleur à travers les parois du four est de 2 % de la quantité totale de chaleur fournie, il est possible d'obtenir l'équation suivante :

$$Q_{paroi} = Q_{entrée} \times 2\% \quad (I-12)$$

✓ Pertes de chaleur par les fumées $Q_{fumées}$

$$Q_{fumées} = f_{fumées} \times H_{fumées} \quad (I-13)$$

$$\text{Avec : } H_{fumées} = Cp_{fumées} \times T_{fumées} \quad (I-14)$$

Où :

$f_{fumées}$: Débit volumique des fumées (Nm^3/h).

$H_{fumées}$: Enthalpie des fumées ($kcal/Nm^3$).

$Cp_{fumées}$: Chaleur spécifique des fumées ($kcal/Nm^3 \cdot C^\circ$).

$T_{fumées}$: Température des fumées (C°).

I.7.1.4. Détermination du rendement d'un four à partir d'un calcul thermique effectué selon la méthode Lobo Evans

Dans le calcul de la quantité de chaleur absorbée par le fluide, on tient compte de la somme des deux modes de transfert de chaleur : le transfert par convection et le transfert par rayonnement. Ces deux modes de transfert de chaleur sont essentiels pour calculer la quantité de chaleur absorbée par le fluide, à la différence du transfert par conduction entre les parois des tubes, qui est négligeable devant ces deux modes de transfert du fait de sa très faible valeur. Le rendement du four peut donc être calculé avec précision par le biais de cette méthode, tout en considérant les dimensions du four. L'équation se présente comme suit :

$$Q_{absorbée} = Q_{radiation} + Q_{convection} \quad (I-15)$$

$$\text{Donc : } \eta = \frac{Q_{radiation} + Q_{convection}}{Q_{entrée}} \quad (I-16)$$

Il est possible de calculer la quantité de chaleur dégagée par la combustion qui sera transférée par rayonnement au fluide qui circule à l'intérieur des tubes, si l'on connaît les dimensions, le nombre et la répartition des tubes de la zone de rayonnement. En effet, ces facteurs sont des caractéristiques géométriques ou de forme qui dépendent uniquement de la conception architecturale du four. Dans ce cas, les phénomènes de convection à l'intérieur de la chambre de combustion sont négligés en raison de leur faible impact sur la quantité de chaleur dégagée. Il est alors possible d'utiliser la méthode de calcul thermique Lobo Evans qui permet de définir le rendement du four en ne prenant en compte que le transfert de chaleur par radiation.

Chapitre I : Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

✓ Zone de radiation

L'équation thermique dans la zone de radiation présentée précédemment prend la forme suivante :

$$Q_{rad} = \sigma F \alpha A_{cp} (T_g^4 - T_t^4) \quad (I-17)$$

Avec :

Q_{rad} : Quantité de chaleur absorbée par radiation en (Kcal/h).

σ : Constante de la loi de Stefan Boltzmann égale à $4.96.10^{-8}$ Kcal/h. m². K⁴.

F : Coefficient global d'échange par rayonnement adimensionnel.

αA_{cp} : Surface du Corps noir équivalente à la surface d'absorption des tubes (m²).

T_t : Température de la surface des tubes (°K).

T_g : Température des gaz de combustion à l'intérieur de la zone de radiation (°K).

Pour déterminer le coefficient d'échange thermique et la surface d'absorption des tubes, il convient de suivre les étapes suivantes :

Coefficient global d'échange par rayonnement F est donné par la formule :

$$F = \frac{1}{\frac{\alpha A_{cp}}{\alpha A_{cp} + A_R} \left(\frac{1}{\varepsilon_f} - 1 \right) + \frac{1}{\varepsilon_t}} \quad (I-18)$$

Avec :

A_R : Surfaces réfractaires réfléchissantes non garnies de tubes

$$A_R = \text{surface totale du four} - \text{surface de la sortie de radiation} - \alpha A_{cp} \quad (I-19)$$

$$\alpha A_{cp} = \alpha \times \text{l'entraxe des tubes} \times \text{le nombre des tubes} \times \text{la longueur des tubes} \quad (I-20)$$

Où :

ε_t : Emissivité des tubes, elle est comprise entre 0.7 et 0.9.

ε_f : Emissivité brut des gaz de combustion

Pour commencer, les pressions partielles de CO₂ et H₂O dans les gaz de combustion sont déterminées en fonction de la nature du combustible et de l'excès d'air envisagé

$$P_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_f} \times P_T \quad (I-21)$$

$$P_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_f} \times P_T \quad (I-22)$$

Avec :

P_{CO_2}, P_{H_2O} : pression partielle de CO₂ et H₂O respectivement dans les fumées (atm).

V_f : Volume réel des fumées (Nm³).

P_T : Pression totale à la sortie des fumées (atm).

Ensuite, il convient également de calculer $P_{(CO_2+H_2O)}$, la somme des pressions partielles :

$$P = P_{(CO_2+H_2O)} = P_{CO_2} + P_{H_2O} \quad (I-23)$$

De plus, En fonction de la géométrie du four, il est possible de déterminer l'épaisseur utile des gaz de combustion (l_e). Un tableau établi par Hottel donne les valeurs de l_e en fonction des dimensions du four (annexe I).

Le coefficient d'absorption du faisceau tubulaire α est donné en fonction de l'entraxe des tubes par rapport au diamètre, de l'exposition des tubes au rayonnement (annexe I).

En fin, en annexe I, un graphe crée par Lobo et Evans permet de déterminer l'émissivité brute des gaz en fonction du produit ($P \times l_e$), de la température du gaz T_g et de la température du tube T_t .

✓ Zone de convection

L'équation thermique dans la zone de convection présentée précédemment prend la forme suivante :

$$Q_{conv} = h_c S_t (T_g - T_t) \quad (I-24)$$

Où :

h_c : Coefficient globale d'échange thermique par convection ($Kcal/h.m^2 \cdot C^\circ$)

S_t : Surface externes des tubes dans la zone de convection (m^2)

T_g : Température des gaz de combustion ($^\circ K$)

T_t : Température de la surface des tubes ($^\circ K$)

Avec :

$$S_t = \text{nombre total des tubes} \times \pi \times d_{ext} \times L \quad (I-25)$$

Où :

d_{ext} : Diamètre extérieur des tubes (m)

L : Longueur des tubes dans la zone de convection (m)

Enfin, la quantité de chaleur absorbée est alors exprimée de la manière suivante :

$$Q_{\text{absorbée}} = Q_{\text{radiation}} + Q_{\text{convection}} = \sigma F \alpha A_{cp} (T_g^4 - T_t^4) + h_c S_t (T_g - T_t) \quad (\text{I-26})$$

Le rendement est donné selon la formule suivante :

$$\eta = \frac{\sigma F \alpha A_{cp} (T_g^4 - T_t^4) + h_c S_t (T_g - T_t)}{Q_{\text{entrée}}} \quad (\text{I-27})$$

I.7.2. Quantité de chaleur absorbée $Q_{\text{absorbée}}$

La quantité de chaleur absorbée est un paramètre essentiel dans l'évaluation des performances d'un four, car elle reflète l'efficacité de l'échange thermique. Ce facteur indique à quel point la quantité de chaleur absorbée par le fluide est suffisante. Si cette valeur est trop faible, des pertes de chaleur importantes se produiront, ce qui réduira les performances du four. Il convient de souligner que cette quantité peut être affectée par un certain nombre de facteurs, notamment le combustible utilisé, la structure du four et la qualité de l'isolation thermique. En outre, il faut tenir compte du problème de l'absorption de chaleur excessive, qui se pose lorsqu'un fluide absorbe plus de chaleur qu'il n'en faut pour produire le résultat escompté. Il peut en résulter des problèmes tels que la déformation des pièces du four, l'usure précoce des matériaux, des fuites de gaz, une consommation excessive de combustible et des risques d'incendie.

Par ailleurs, la qualité des produits peut s'en trouver affectée et les temps d'arrêt pour entretien et réparations deviennent coûteux. Par conséquent, pour éviter une absorption excessive de chaleur, il est nécessaire de maintenir un suivi de la quantité de chaleur absorbée et de prendre des mesures pour la limiter.

Il existe un certain nombre de causes qui peuvent être à l'origine d'une absorption excessive, comme un flux d'air ou une circulation de gaz inadéquats, une perte de chaleur excessive à travers les parois du four, ou même une surcharge du four. Ces éléments risquent de conduire à une accumulation de chaleur à l'intérieur du four, susceptible de créer un déséquilibre thermique.

En déterminant le rendement d'un four, l'équation de la quantité de chaleur absorbée par le fluide est également considérée. Cette équation est obtenue par le bilan thermique selon la formule suivante :

$$Q_{\text{absorbée}} = Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{paroi}} - Q_{\text{fumées}} \quad (\text{I-6})$$

I.7.3. Coefficient globale d'échange thermique par convection h

L'un des facteurs qui influent sur l'efficacité d'un four est le coefficient de transfert de chaleur par convection (h). Ce coefficient qui dépend d'un certain nombre de facteurs tels que le régime d'écoulement du fluide, ses caractéristiques physiques et thermiques (viscosité, conductivité thermique, masse volumique, etc.) et la paroi avec laquelle il entre en contact, caractérise la quantité de chaleur échangée par convection entre le fluide et la paroi des tubes.

Le coefficient de transfert de chaleur par convection (h) peut être considérablement réduit en raison de la formation d'une couche de coke à l'intérieur des tubes, qui peut provoquer une accumulation de chaleur. Ce problème risque d'entraîner des températures élevées susceptibles d'endommager les tubes et de générer des situations dangereuses tels que des incendies ou des explosions. En outre, la présence de coke à l'intérieur des tubes peut empêcher l'écoulement du fluide, et par conséquent réduire l'efficacité énergétique du four, augmenter les frais d'entretien et prolonger le temps d'arrêt lié au nettoyage des tubes. Des corrélations empiriques issues de données expérimentales sont utilisées pour calculer h . En tenant compte des caractéristiques du procédé, notamment le débit massique, la température, la géométrie de la surface et les caractéristiques du fluide, ces corrélations donnent une approximation du coefficient de transfert de chaleur.

Tout d'abord, le type de régime d'écoulement doit être déterminé en calculant le nombre de Reynolds [28, 29], En mécanique des fluides, le nombre de Reynolds (Re) est une grandeur adimensionnel utilisé pour décrire le régime d'écoulement d'un fluide dans une conduite. Il est défini comme le rapport entre l'inertie et la viscosité du fluide. Il est exprimé par l'équation suivante :

$$Re = \frac{\rho \times U \times D}{\mu} = \frac{G \times D}{\mu} \quad (\text{I-28})$$

$Re < 2300$ le transfert de chaleur est en régime laminaire, sinon, si $10^4 < Re < 12 \times 10^4$ Le transfert de chaleur est en régime turbulent.

Chapitre I : Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

Ensuite, le nombre de Prandtl [28, 29], Il s'agit d'une grandeur sans dimension utilisée pour décrire la manière dont la chaleur est transférée à l'intérieur d'un fluide. Il indique la proportion entre la diffusivité thermique (conductivité thermique) et la diffusivité par transfert de quantité de mouvement du fluide (viscosité). Il se calcule de la manière suivante :

$$Pr = \frac{c_p \times \mu}{k} \quad (I-29)$$

Enfin, le nombre de Nusselt [28, 29] est une grandeur adimensionnel considéré comme le rapport du flux de chaleur globalement transféré dans le fluide en flux de chaleur transféré par conduction. En effet, de nombreuses lois empiriques existent pour calculer le nombre de Nusselt à partir des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl, ces lois permettant de déterminer le coefficient de transfert de chaleur convectif (h) dans différents types d'écoulements. Parmi ces relations empiriques, on peut citer :

La relation empirique de Mc Adams pour un transfert de chaleur en régime turbulent à l'intérieur d'une conduite, l'équation est donnée comme suit :

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (I-30)$$

Pour un transfert de chaleur en régime laminaire à l'intérieur d'une canalisation cylindrique : Leveque a proposé une expression mathématique pour une température constante de la paroi du tube $T_p = cste$ et une température variable du fluide depuis l'entrée jusqu'à la sortie, La corrélation est définie comme suit dans ce cas :

$$Nu = 1,607 \left(\frac{D}{L} Pr Re \right)^{1/3} \quad (I-31)$$

Sieder et Tate ont proposé une relation dans le cas du chauffage ou de refroidissement de liquide très visqueux, la formule est donnée comme suit :

$$Nu = 1,86 \left(\frac{D}{L} Pr Re \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0,14} \quad (I-32)$$

Dans cette relation toutes les propriétés du fluide sont évaluées à sa température moyenne entre l'entrée et la sortie de la canalisation μ_p est la viscosité évaluée à la température moyenne de la paroi.

Il convient de noter que, dans notre étude de cas, la relation adoptée est celle de Leveque. Une fois que le nombre de Nusselt est établi à partir de l'équation appropriée, il est

facile de déterminer le coefficient d'échange par convection en fonction du nombre de Nusselt à partir de l'équation suivante :

$$Nu = \frac{h \times D}{k} \quad (I-33)$$

Où :

D : Représente le diamètre interne du tube (m).

ρ : masse volumique du fluide (Kg/m^3).

c_p : Chaleur spécifique du fluide ($Kcal/m^3 \cdot ^\circ C$)

k : conductivité thermique ($W/m \cdot ^\circ C$).

μ : Viscosité dynamique ($Pa \cdot s$).

G : Vitesse massique du fluide en ($Kg/s \cdot m^2$).

h : Coefficient globale d'échange thermique par convection ($kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$).

I.8. Effets sur l'environnement des émissions de polluants émis par les fours industriels

I.8.1. Polluants

Les fours sont des appareils qui demandent beaucoup d'énergie en plus d'avoir un effet néfaste sur l'environnement, notamment en raison des émissions qu'ils rejettent dans l'atmosphère. Il convient de mentionner que certains très grands fours des secteurs de la sidérurgie, de la cimenterie et des industries chimiques peuvent rejeter plus d'un million de tonnes de fumées par an à travers leurs cheminées [20].

Les polluants qui apparaissent le plus souvent dans les fours industriels comprennent :

- ✓ Les oxydes de soufre (SO_2 et SO_3) produits par la présence de soufre contenu dans certains types de combustibles comme le fioul.
- ✓ Les oxydes d'azote (NO , NO_2 , N_2O) sont des sous-produits de la combustion qui proviennent soit de la combustion de combustibles à teneur en azote, soit de la réaction à haute température de l'azote et de l'oxygène de l'air.
- ✓ Le monoxyde de carbone (CO) est présent dans les fours quand la combustion a lieu en présence d'un déficit d'air.
- ✓ Poussières liées sous-produits solides issus de produits chauffés et transportés par les fumées

De plus, les composés du fluor, du chlore, les composés organiques volatils (COV) peuvent être localisés dans des installations plus particulières. Les fumées contiennent

également du dioxyde de carbone (CO₂) Bien qu'il ne s'agisse pas d'un polluant au sens propre du terme, le CO₂ agit sur le climat en raison de l'effet de serre qu'il crée.

I.8.2. Réglementation des émissions de gaz

Les principaux objectifs de la réglementation sur les fours sont la préservation de l'environnement et la limitation des émissions polluantes. Bien que les normes et les lois diffèrent d'un pays à l'autre, de nombreuses directives européennes ont un impact important sur les fours industriels en raison des limites strictes qu'elles imposent aux émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques provenant des fours utilisés dans l'industrie. Par exemple, la directive IPPC (prévention et réduction intégrées de la pollution) fournit une liste globale dans laquelle figurent les principaux polluants atmosphériques à tenir en compte pour mettre en place des seuils maximaux des émissions.

Les fours utilisés dans des secteurs spécifiques, tels que la cimenterie et la sidérurgie, peuvent également être régis par d'autres réglementations. Il s'agit notamment de normes relatives à la consommation d'énergie, à la récupération de la chaleur et à la réduction des émissions. En résumé, les réglementations relatives aux fours cherchent à promouvoir une exploitation durable et consciente de ces équipements, en minimisant leur impact sur l'environnement et en veillant à la protection de la santé et de la sécurité des personnes et du milieu environnant.

I.9. Conclusion

Le chapitre présent est consacré aux fours industriels, qui constituent l'équipement de base nécessaire à la production dans de nombreux domaines de l'industrie. Tout d'abord, nous avons identifié les différents types de fours industriels qui existent dans les industries et nous avons présenté un aperçu global sur les différents composants des fours ainsi que leurs classifications. Nous avons également opté pour les notions de chauffage thermique en expliquant comment la chaleur est transmise au fluide de manière à ce qu'il y ait une modification de l'état physique du fluide ou bien sans changement de l'état du fluide sans oublier que dans certains cas, le four est vu comme un réacteur où la réaction chimique se passe à l'intérieur du four. D'autre part, un autre aspect non négligeable réside dans le fait que nous avons décrit les critères à prendre en compte lors du choix du type de four adapté à une activité industrielle donnée et que nous voulons implanter selon les conditions de cette activité afin d'avoir le four le mieux adapté à un processus donné.

Chapitre I : Fours industriels : rôle, typologie et principes de fonctionnement

Nous avons ensuite présenté une description générale d'un four tubulaire et des éléments indispensables reliés à ce dernier pour assurer son bon fonctionnement ainsi que sa sécurité et le maintien de l'intégrité du four. De même, ce chapitre porte sur le système de tirage, dont le rôle est de créer une combustion efficace en toute sécurité, ainsi que le dépannage de l'équipement, en vue d'établir un diagnostic capable de résoudre les problèmes liés aux facteurs susceptibles de survenir durant le fonctionnement du four.

Une partie essentielle est consacrée aux modes de transfert de chaleur dans un four, dans laquelle nous avons effectué le calcul thermique des paramètres de performance à partir des concepts de transfert de chaleur abordés. Enfin, les fours utilisés peuvent avoir un effet négatif sur l'environnement en raison des déchets générés et la pollution de l'air. Il est donc impératif que les fabricants de fours respectent toutes les lois applicables pour garantir la sécurité, la qualité et la protection de l'environnement. Afin d'évaluer au mieux les effets des fours sur l'environnement et de développer des stratégies pour les limiter, les émissions de polluants doivent également être quantifiées et surveillées.

Chapitre II

Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

Sommaire du chapitre:

II.1. Introduction	43
II.2. Mettre à profit l'expérience passée pour renforcer la performance et la sécurité des systèmes : L'importance du retour d'expérience "RETEX"	43
II.3. Retour d'expérience dans l'industrie : valoriser l'expérience acquise au service de l'efficacité des procédés industriels	44
II.4. Méthodologie et principales étapes de l'analyse et de l'acquisition de connaissances tirées de l'expérience passée.....	45
II.5. Accidentologie des fours industriels.....	45
II.5.1. Retours d'expérience issu de la base de données ARIA.....	46
II.5.1.1. Raffinage de pétrole « 07/12/2005, France (Petit-Couronne) »	46
II.5.1.2. Raffinage de pétrole « 19/06/2006, France (Petit-Couronne) »	46
II.5.1.3. Raffinage de pétrole « 05/10/1972, France (Nouvelle-Calédonie) »	47
II.5.1.4. Raffinage de pétrole « 26/10/1967, France (Nouvelle-Calédonie) »	47
II.5.2. Explosion de l'unité FCC à la raffinerie Husky Superior 2018.....	47
II.5.3. Explosion et incendie dans la raffinerie Tesoro	48
II.5.4. Explosion du four 100-F1, Algérie (Skikda 2013)	49
II.6. Les grands risques sur les fours industrielles	50
II.6.1. Incendie et explosion.....	50
II.6.1.1. Feu de nappe	51
II.6.1.2. Feu de jet	51
II.6.1.3. Explosion UVCE.....	51
II.6.2. Retour de flamme au niveau des brûleurs	52
II.6.3. Surpression à l'intérieur du four	52

II.6.4. Risque lié à la corrosion.....	53
II.6.5. Formation de coke.....	53
II.6.6. Exposition aux substances dangereuses.....	53
II.6.7. Défaillance de certains composants de l'équipement.....	53
II.6.8. Dangers et Risques électriques.....	54
II.6.9. Toxicité par le monoxyde de carbone.....	54
II.6.10. Erreur humaine.....	54
II.6.11. Brûlure et autre type de blessure.....	55
II.7. Aperçu sur différents types de barrières de sécurité utilisées en milieu industriel.....	55
II.7.1. Barrières techniques de sécurité.....	55
II.7.1.1. Dispositifs de sécurité (passifs).....	56
II.7.1.2. dispositifs de sécurité actifs.....	57
II.7.1.3. Barrières instrumentées de sécurité (BIS).....	58
II.7.2. Barrières à action manuelle de sécurité (BAMS).....	58
II.7.2.1. Barrières de verrouillage/étiquetage.....	58
II.7.3. Barrières humaines de sécurité.....	59
II.8. Mesures préventives mises en place pour prévenir des accidents de fours industriels	60
II.8.1. les instruments de contrôle.....	60
II.8.2. Détection d'incendie.....	61
II.8.2.1. Détection de flamme.....	61
II.8.2.2. Détection de gaz inflammable.....	61
II.8.3. Système de protection contre l'incendie.....	62
II.8.3.1. Protection incendie active.....	62
II.8.3.2. Protection Incendie Passive.....	63
II.8.4. Autre mesure de protection contre l'incendie.....	64
II.9. Normes et réglementations pour la sécurité des fours industrielles.....	64
II.9.1. Norme internationale.....	65

II.9.2. Réglementation Algérienne.....	65
II.9.3. Référentiels de SONATRACH	66
II.10. Synthèse globale	67
II.11. Conclusion	69

II.1. Introduction

Les accidents de fours industriels sont souvent catastrophiques et peuvent entraîner des pertes de vies humaines, des dommages matériels importants et des atteintes à l'environnement. Ces accidents peuvent survenir pour diverses raisons [35,36,37], notamment une défaillance de l'équipement, une erreur humaine et des protocoles de sécurité inadéquats. Il est donc important de mener des enquêtes approfondies sur les accidents de four et de tirer les leçons qui s'imposent.

Les informations tirées de l'étude des accidents de fours peuvent être utilisées pour identifier les domaines dans lesquels les mesures de sécurité industrielle, la conception des équipements et les procédures d'intervention en cas d'urgence doivent être améliorées. En outre, elles peuvent contribuer à sensibiliser les parties prenantes aux risques liés aux fours industriels et à l'importance de maintenir des mesures de sécurité appropriées pour éviter les accidents.

Pour mieux comprendre les causes de ces accidents et leurs effets potentiels, il est essentiel, dans ce cas, de faire des recherches sur les accidents de fours industriels survenus dans le passé. En adoptant des mesures proactives pour réduire le risque d'accidents de fours, nous pouvons contribuer à garantir la sécurité de la vie humaine, des biens et de l'environnement.

Un aperçu de quelques exemples historiques permettra de mieux illustrer l'importance de la connaissance et de la prévention des accidents industriels sur le lieu de travail. L'analyse de ces accidents nous permet de mieux comprendre les causes profondes et les effets des accidents de fours, ce qui nous amène également à trouver de nouvelles solutions pour réduire les risques à l'avenir. Cette démarche est appelée le retour d'expérience, qui met en évidence l'intérêt de l'analyse des risques industriels.

II.2. Mettre à profit l'expérience passée pour renforcer la performance et la sécurité des systèmes : L'importance du retour d'expérience "RETEX"

Un retour d'expérience (RETEX) est une démarche qui vise à tirer des connaissances et analyser des anomalies d'une expérience passée et qui permet notamment de revenir sur l'origine d'un problème. L'objectif du RETEX est d'identifier les points forts et les points faibles de l'expérience, telle qu'un événement, une situation ou un projet et d'analyser les causes et les

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

facteurs ayant contribué au succès ou à l'échec, et de proposer des actions correctives et préventives pour améliorer les performances futures.

II.3. Retour d'expérience dans l'industrie : valoriser l'expérience acquise au service de l'efficacité des procédés industriels

Le RETEX peut également contribuer à la prévention de certains accidents industriels, comme les incendies et les explosions, tout en améliorant les performances et l'efficacité des procédés industriels, Nous présentons brièvement quelques exemples :

- Analyse des risques : Le RETEX peut aider les entreprises à identifier les risques potentiels liés aux activités industrielles, tels que les risques d'incendie et d'explosion. Cette analyse permet de proposer des mesures préventives pour éviter ces risques.
- Amélioration des équipements : identifier les équipements et les systèmes qui présentent des risques potentiels. Cette analyse peut conduire à des améliorations des équipements pour réduire les risques d'incendie et d'explosion.
- Formation et sensibilisation : Le RETEX peut être utilisé pour sensibiliser les employés aux risques d'incendie et d'explosion, ainsi qu'aux mesures de prévention à prendre. Les entreprises peuvent proposer des programmes de formation pour renforcer les compétences de leurs employés en matière de sécurité industrielle.
- Amélioration de la productivité : identifier les étapes des processus qui ont causé des retards ou des interruptions dans le passé et proposer des solutions pour améliorer la productivité.
- Réduction des temps d'arrêt : Le RETEX peut aider à identifier les causes des temps d'arrêt et à proposer des mesures pour les éviter à l'avenir. Cela peut réduire les coûts de production et améliorer la fiabilité des processus industriels.
- Optimisation des ressources : identifier les processus qui consomment trop de ressources (par exemple, de l'énergie ou des matières premières) et proposer des améliorations pour optimiser l'utilisation de ces ressources.

Le fait d'améliorer les performances et l'efficacité des procédés industriels peut aider à augmenter la rentabilité, à réduire les coûts et surtout à renforcer la position concurrentielle de l'entreprises sur le marché.

II.4. Méthodologie et principales étapes de l'analyse et de l'acquisition de connaissances tirées de l'expérience passée

Lors d'un retour d'expérience, il est essentiel de suivre une méthodologie rigoureuse pour analyser et évaluer l'expérience passée. La collecte de données, l'analyse des causes et des effets, l'identification des enseignements tirés, la mise en œuvre d'actions correctives et préventives et la communication des résultats à l'ensemble de l'organisation sont des étapes clés. En suivant cette méthodologie, il est possible de tirer le meilleur parti des expériences passées. Un retour d'expérience se déroule conformément à une méthodologie comportant différentes étapes :

- Déterminer l'objectif et le sujet de l'analyse. Cette étape est cruciale car elle permet de clarifier les raisons pour lesquelles vous souhaitez mener une analyse rétrospective, c'est-à-dire examiner les événements passés avec un œil critique et définir les facteurs qui ont contribué à l'issue de l'événement et de déterminer les objectifs à atteindre et les résultats souhaités.
- Définir et préciser les positions des différentes parties intervenantes dans le processus avec des rôles et des responsabilités distincts, chaque partie intervenante dans le processus d'analyse joue un rôle spécifique pour garantir que l'enquête est menée de manière efficace et que les connaissances acquises sont pertinentes et utiles. En collaborant, ces intervenants peuvent améliorer la performance opérationnelle et éviter de futures erreurs ou incidents.
- Collecte et l'analyse d'informations en mettant particulièrement en évidence les enseignements tirés de l'expérience, cette étape est essentielle pour un retour d'expérience réussi. Elle permet de transformer l'expérience passée en une source d'apprentissage en futur et d'améliorer la performance de l'organisation.

II.5. Accidentologie des fours industriels

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux différents types d'accidents survenus dans les fours et ces résultats sont issus des processus de retour d'expérience retenus dans différentes sources notamment la base de données ARIA [40] et l'agence fédérale CSB [39] responsable des investigations sur les accidents chimiques industriels.

II.5.1. Retours d'expérience issu de la base de données ARIA

II.5.1.1. Raffinage de pétrole « 07/12/2005, France (Petit-Couronne) »

La raffinerie de Petit-Couronne a subi une explosion suivie d'un incendie vers 5h30 dans l'unité d'hydrotraitement située à Petit-Couronne, en Seine-Maritime (France). L'accident a principalement touché l'un des fours de l'unité : rompre un des tubes du four tout en détruisant l'enceinte, ce dernier ayant été éventré sur une largeur de 1 m et sur toute sa hauteur. Le POI est mis en place. Le service d'inspection des installations qualifiées intervient sur les lieux de l'accident. Trois heures avant l'explosion, le four a été arrêté ; personne n'a été blessé. À 6h10, l'incendie est maîtrisé et à 6h45, le feu est éteint.

L'unité d'hydrotraitement est mise hors service pour effectuer des travaux permettant de la sécuriser (isolation, dégazage, mise sous azote du four, mise en place d'équipements d'extinction à titre préventif). Cette unité ne reprendra son activité qu'à partir de janvier 2006, date à laquelle elle sera mise hors service pour maintenance. Une fois l'intégrité de tous les équipements proches du lieu de l'explosion vérifiée, Le PC de crise de l'établissement sera finalement arrêté à 9h25. Le redémarrage dépend de la conclusion d'une enquête et de l'application des mesures adéquates.

II.5.1.2. Raffinage de pétrole « 19/06/2006, France (Petit-Couronne) »

Dans la raffinerie, les trois fours de l'unité de distillation atmosphérique sont reliés à une cheminée qui produit une quantité importante de fumée noire. La conduite d'évacuation reliant ces fours présentait également un problème de surchauffe. Le débit de brut a été interrompu et l'opération d'arrêt d'urgence a été effectuée en injectant de la vapeur d'étouffement dans les fours. Le feu a été rapidement maîtrisé, en dehors de toute intervention extérieure.

En raison de la présence de coke à l'intérieur du tube chargé de pétrole brut, un tube de 150 mm de diamètre dans l'un des fours s'est rompu longitudinalement, provoquant l'événement. Un échauffement anormal de la paroi du tube et la rupture qui s'en est suivie ont été provoqués par une diminution de la capacité d'échange thermique. En raison d'un manque de charge après cet événement, de nombreuses unités ont dû être progressivement arrêtées. Selon les prévisions, cet événement a eu un impact économique de 40 millions d'euros et un impact limité sur l'environnement.

II.5.1.3. Raffinage de pétrole « 05/10/1972, France (Nouvelle-Calédonie) »

En raison d'une surchauffe locale, un four vertical a été mis en service en faisant circuler de l'essence, alors qu'une passe était déconnectée et qu'il n'y avait pas de circulation de produit. Lorsqu'un tube a éclaté, l'essence s'est répandue sur le sol, déclenchant un feu de nappe de 30 mètres de long qui a duré jusqu'à ce que la pompe de charge soit arrêtée. Les flammes persistent durant 20 minutes. Tous les éléments de contrôle et le four ont été détruits.

II.5.1.4. Raffinage de pétrole « 26/10/1967, France (Nouvelle-Calédonie) »

Une unité d'hydrotraitement d'une raffinerie prend feu. Un tube de four a éclaté lors d'un délestage imprévu, ce qui a déclenché l'incendie. L'incident a eu lieu à la suite d'un orage après un 3/4h et qui a été à l'origine de deux coupures ainsi que, entre autres, de chutes de tension dans l'unité. Lorsqu'un accident se produit, l'unité se réinitialise. Parmi les autres répercussions de l'orage, on peut citer l'arrêt des utilités et des altérations du réseau alimentant l'installation. L'accident n'a fait aucun blessé.

II.5.2. Explosion de l'unité FCC à la raffinerie Husky Superior 2018

La raffinerie Husky Superior, dans Wisconsin, une forte explosion s'est produite dans l'unité de craquage catalytique à lit fluidisé (FCC) le 26 avril 2018. La fuite et le dégagement d'hydrocarbures hautement inflammables ont été déclenchés par la rupture d'une vanne. L'explosion a provoqué une conflagration qui a continué à brûler pendant des heures et qui pouvait être entendue et ressentie à des kilomètres de distance. Cette explosion n'a heureusement pas fait de victimes et n'a entraîné que des blessures mineures et des symptômes dus à l'exposition à la fumée et aux émanations.

L'unité de FCC est un grand four utilisé pour convertir le pétrole brut lourd en hydrocarbures plus légers, tels que l'essence et le carburant diesel. L'explosion et l'incendie ont causé des dommages importants à la raffinerie. L'unité a été arrêtée pendant plusieurs mois, ce qui a entraîné des perturbations dans l'approvisionnement en carburant de la région. L'explosion a également causé des dommages environnementaux, notamment le rejet de produits chimiques dangereux dans l'air et dans l'eau.

Le rapport d'enquête a mis en évidence que l'explosion a eu pour origine un ensemble de facteurs liés à une défaillance de l'équipement, un acte de négligence par certains employés et des mesures de sécurité insuffisantes. La vanne rompue était mal maintenue ou inspectée, et la

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

raffinerie a omis de mettre en œuvre des mesures de sécurité adéquates pour prévenir ou limiter le risque d'une explosion. Le rapport d'enquête a formulé plusieurs recommandations visant à améliorer les pratiques de sécurité de la raffinerie, notamment en améliorant la maintenance et l'inspection des équipements, en renforçant les procédures de sécurité et en mettant en place des plans d'intervention d'urgence plus efficaces [38].



Figure II.9. Fumée de l'incendie de la raffinerie Husky Superior [38].

II.5.3. Explosion et incendie dans la raffinerie Tesoro

Le 2 avril 2010, un incendie de four s'est produit dans l'unité d'hydrotraitement du naphta de la raffinerie Tesoro d'Anacortes, de Washington. L'incendie a entraîné la mort de sept travailleurs et causé des blessures à deux autres.

L'enquête sur l'incident a révélé que le four n'avait pas été correctement inspecté pendant près de dix ans et que la société Tesoro n'avait pas identifié et traité de manière adéquate les risques de sécurité associés à l'unité. En outre, la raffinerie ne disposait pas de systèmes d'arrêt automatique qui auraient pu prévenir ou minimiser les effets d'un incendie. L'incident a mis en évidence l'importance des inspections de sécurité et de la maintenance en cours dans les installations industrielles, ainsi que la nécessité de mesures et d'équipements de sécurité adaptés pour prévenir et réduire les effets de tels accidents [39].

II.5.4. Explosion du four 100-F1, Algérie (Skikda 2013)

L'explosion du four 100-F1, le 3 janvier 2013, à la raffinerie de Skikda en Algérie est un accident industriel majeur. Les employés de la raffinerie de Skikda se préparaient à redémarrer l'unité d'hydrocraquage, qui avait été arrêtée pour maintenance dans le cadre du projet de réhabilitation et l'extension de la capacité de la raffinerie. L'unité d'hydrocraquage est un élément important de la raffinerie, car elle transforme le pétrole brut en produits de plus grande valeur tels que l'essence et le carburant diesel. Dans le cadre de la procédure de démarrage, les ouvriers ont commencé à injecter de l'hydrogène dans le four, conçu pour fonctionner à des températures et des pressions élevées. Cependant, une vanne du système d'injection d'hydrogène s'est avérée défectueuse et a commencé à laisser échapper du gaz. Le gaz qui s'est échappé s'est rapidement enflammé, provoquant une explosion massive qui a secoué l'ensemble du complexe de la raffinerie

La description que nous avons fournie précédemment était basée sur le rapport officiel publié par le gouvernement algérien, qui a conclu que l'explosion avait été causée par une fuite d'hydrogène gazeux provenant d'une vanne défectueuse dans le système d'injection d'hydrogène.

Cependant, d'autres sources ont suggéré que l'accident pourrait avoir été causé par une augmentation du flux de combustible dans le four. Selon cette hypothèse, la conduite transportant le pétrole brut à l'intérieur du four s'est rompue sous l'effet d'une pression et d'une chaleur excessives, provoquant l'échappement et l'inflammation de vapeurs d'hydrocarbures, ce qui aurait entraîné l'explosion.

Il est important de noter que les accidents industriels sont des événements complexes qui impliquent souvent de multiples facteurs, et qu'il peut être difficile de déterminer la cause précise d'un accident. L'enquête sur l'explosion de la raffinerie de Skikda a pu impliquer plusieurs agences et experts, et il est possible que différentes sources aient présenté des résultats ou des conclusions différents.

Quelle que soit la cause précise de l'accident, il est clair que l'explosion de la raffinerie de Skikda a eu un impact dévastateur sur la communauté et a souligné l'importance d'une maintenance et de procédures de sécurité appropriées dans les environnements industriels [41 ,42].



Figure II.10. Explosion à l'unité 100 de la raffinerie de Skikda [41]

II.6. Les grands risques sur les fours industrielles

Les fours industriels sont des équipements essentiels dans le secteur industriel. Ils sont utilisés dans l'industrie pour diverses applications. En fonction de leurs besoins, les entreprises utilisent ces fours pour transformer les matières premières en produits finis. Cependant, l'utilisation de ces équipements présente des risques majeurs pour la santé et la sécurité des travailleurs, ainsi que pour l'environnement et les installations environnantes. Une analyse du retour d'expérience sur les accidents dans les fours industriels provenant de plusieurs sources a permis d'identifier les principaux risques qui peuvent survenir dans ces équipements. Une synthèse des risques identifiés est présentée ci-après :

II.6.1. Incendie et explosion

L'un des risques les plus importants associés aux fours industriels est le risque d'incendie ou d'explosion. Ce phénomène peut être dû à divers facteurs, notamment une surchauffe, un mauvais rapport combustible-air et la présence de matériaux inflammables ou explosifs, une défaillance de l'équipement, l'accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion et l'erreur humaine. Par exemple, un incendie peut se déclencher si des matières inflammables, telles que des solvants, des huiles ou des gaz, s'échappent du four ou de l'équipement de traitement et entrent en contact avec une source de chaleur, telle qu'une flamme, une étincelle ou un élément chauffant. De même, une explosion peut se produire si une

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

atmosphère explosive se forme à l'intérieur ou autour du four, par exemple à la suite d'une fuite de gaz inflammable qui s'accumule et atteint sa limite d'explosivité. Les risques d'incendie et d'explosion peuvent également résulter d'une défaillance de l'équipement. Une surchauffe ou une fuite de liquide de refroidissement, par exemple, peut endommager les composants du four, entraînant une défaillance de l'équipement et un incendie ou une explosion. L'erreur humaine peut également contribuer à l'apparition de ces risques, comme une mauvaise manipulation de l'équipement ou un manque de formation et de contrôle adéquats [43]. Certains types d'incendies sont susceptibles de se produire dans les fours industriels :

II.6.1.1. Feu de nappe

Le feu de nappe [62,66] apparaît lorsqu'un liquide inflammable émet des vapeurs inflammables. Il s'agit d'un phénomène de combustion qui se produit de façon auto-entretenue. Les flammes se forment lors de la combustion, qui a lieu en phase gazeuse. La nature exothermique de la réaction de combustion fournit l'énergie nécessaire à l'émission de gaz inflammables.

II.6.1.2. Feu de jet

Les termes " feu de jet " et " feu de torche " paraissent souvent identiques [63,67], étant donné qu'ils se réfèrent tous à un phénomène de combustion résultant de rejets de fluides inflammables, qui peuvent être à l'état gazeux ou liquéfié, suite à une fuite intempestive ou intentionnelle. Si la température du fluide est suffisamment importante, il peut s'enflammer spontanément. Si une source d'inflammation est présente à proximité du site de rejet, elle peut également s'enflammer.

Les feux de jet se déclarent généralement dans les canalisations par une perforation ou une fissure, bien qu'ils puissent également résulter d'une vanne de purge laissée ouverte.

II.6.1.3. Explosion UVCE

UVCE [64,65] est un terme anglais qui désigne l'explosion d'un nuage de vapeur non confiné (Unconfined Vapor Cloud Explosion). En cas de fuite de gaz combustible, le mélange de gaz et d'air peut créer un nuage inflammable. Quand le nuage atteint une concentration explosive et entre en contact avec une source d'inflammation, la combustion se répand rapidement à travers le nuage, produisant une onde de pression et de chaleur qui peut infliger de graves dommages. Les impacts de pression sont les principaux facteurs d'effets.

II.6.2. Retour de flamme au niveau des brûleurs

un autre risque lié aux fours industriels. Un retour de flamme se produit lorsque la flamme du four se réallume dans la mauvaise direction et retourne vers la conduite de combustible, ce qui peut mener à une explosion. Les retours de flamme peuvent se produire à cause de nombreux facteurs, notamment un mauvais rapport air/carburant, des conduites de carburant obstruées ou une ventilation inadéquate. En plus, des changements dans les paramètres de fonctionnement du four, tels qu'une augmentation soudaine de la pression du fuel peut augmenter le danger d'un retour de flamme. Pour éviter les retours de flamme, il convient de maintenir un rapport combustible/air approprié et de s'assurer que le four est correctement ventilé. L'entretien et l'inspection périodiques des conduites de combustible permettent également d'éviter les bouchages et d'assurer un meilleur fonctionnement de l'appareil de chauffage. Une formation adéquate des employés sur le fonctionnement du four et les mesures de sécurité peuvent également aider à prévenir les retours de flammes en les sensibilisant aux risques potentiels et à la manière d'utiliser le four en toute sécurité [44 ,45].

II.6.3. Surpression à l'intérieur du four

L'augmentation de la pression à l'intérieure de la chambre de combustion est un autre risque lié aux fours industriels. La surpression se produit lorsque la pression à l'intérieur du four dépasse ses limites de design, ce qui peut entraîner une explosion. La surpression peut être causée par un certain nombre de facteurs, tels que problèmes de ventilation, en cas de mauvaise évacuation des fumées, la pression à l'intérieur du four peut augmenter suite à l'accumulation de chaleur. une défaillance de l'équipement ou des changements dans les conditions opératoires. Elle peut aussi survenir si le four n'est pas adapté aux matériaux ou aux conditions d'exploitation pour lesquels il est utilisé. Pour pouvoir éviter les surpressions, il est essentiel d'inspecter et d'entretenir régulièrement le four et son système de ventilation afin de s'assurer qu'ils sont en bon état de fonctionnement. En plus, il est essentiel de s'assurer que le four est bien conçu pour traiter les matériaux et les conditions de travail pour lesquels il a été créé. Des soupapes de surpression sont également utilisées pour réduire les surplus de pression et éviter les surpressions. Quand la pression à l'intérieur du four atteint un certain seuil, la soupape de sûreté s'ouvre, permettant à l'excès de pression de s'échapper par une sortie désignée. Cela prévient que la pression n'atteigne des niveaux dangereux qui pourraient endommager le four ou les équipements environnants et prévenir toute rupture ou explosion du four [46].

II.6.4. Risque lié à la corrosion

La corrosion se produit lorsque les matériaux métalliques sont soumis à des conditions de fonctionnement sévères, telles que des températures hautes, des gaz corrosifs et des produits chimiques, ce qui peut engendrer la détérioration et l'affaiblissement de la structure du four.

La corrosion peut entraîner des défaillances de l'équipement, des fuites et d'autres risques très dangereux. Elle peut également diminuer la durée de vie du four et entraîner des réparations ou des travaux de remplacement coûteux. Les fours peuvent être construits avec des matériaux résistants à la corrosion, tels que l'acier inoxydable, et enrobés de matériaux de protection pour éviter l'exposition à des matières corrosives. En outre, la maintenance et le contrôle réguliers du four permettent d'identifier tout signe de corrosion et de réparer ou de changer en temps voulu les éléments endommagés.

II.6.5. Formation de coke

L'accumulation de coke dans les tubes est un autre risque associé aux fours industriels. La cokéfaction se forme quand des dépôts carbonés s'accumulent dans les tubes, entraînant une réduction de la performance du transfert de chaleur et un risque d'endommagement des tubes. La formation de coke peut provoquer des fuites dans les fours industriels de différentes manières. Lorsque des dépôts de carbone se forment dans les tubes, ils peuvent empêcher les substances et les gaz de passer dans le four, ce qui entraîne une augmentation de la pression et de la température du four, une dilatation du tube et, finalement, une fissuration ou une rupture, menant à une fuite. Pour éviter les fuites liées au coke, le four et ses composants, y compris les tubes, doivent être inspectés et entretenus régulièrement. Un nettoyage régulier du four et ses tubes permet d'éviter l'accumulation de coke et de garantir une performance optimale [47 ,48].

II.6.6. Exposition aux substances dangereuses

Les fours industriels peuvent être utilisés pour traiter des matières dangereuses comme des produits chimiques ou des métaux qui libèrent des fumées ou des poussières toxiques. Ces matières dangereuses peuvent provoquer des problèmes respiratoires, des irritations cutanées et d'autres problèmes de santé chez les personnes qui opèrent ou se trouvent à proximité du four.

II.6.7. Défaillance de certains composants de l'équipement

Les fours sont des équipements dont le fonctionnement est complexe et qui doivent faire l'objet d'un suivi régulier afin de fonctionner de manière sécurisée et efficace. Une vanne de

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

régulation défectueuse, par exemple, peut créer des conditions dangereuses dans le four et accroître le risque d'incendie ou d'explosion.

II.6.8. Dangers et Risques électriques

Si des mesures de sécurité correctes ne sont pas prises lorsque les fours industriels sont alimentés par l'électricité, ils peuvent présenter un risque important de dangers électriques. Un choc électrique ou une électrocution peuvent se produire si les travailleurs entrent en contact avec des composants électriques sous tension ou si le système électrique présente un court-circuit ou une surcharge.

Un orage électrique ou la foudre peuvent également être à l'origine de risques électriques dans les fours industriels. La foudre peut provoquer des surtensions et des perturbations électriques pendant un orage, ce qui peut endommager l'équipement électrique et créer des situations dangereuses. Il est essentiel de prendre des mesures de mise à la terre et de protection contre les surtensions, ainsi que de respecter les procédures d'arrêt appropriées, afin d'éviter toute détérioration de l'équipement et d'assurer la sécurité des travailleurs en cas d'orage. Il est également essentiel d'inspecter et d'entretenir régulièrement les équipements électriques afin de pouvoir identifier et traiter les risques potentiels avant qu'ils ne finissent par devenir un problème [49 ,50].

II.6.9. Toxicité par le monoxyde de carbone

Les fours industriels peuvent libérer du monoxyde de carbone (CO), un gaz incolore, inodore et hautement toxique. Un empoisonnement au CO peut se produire lorsque le four n'est pas suffisamment ventilé ou lorsque le mélange air-carburant n'est pas optimal, ce qui conduit à une combustion incomplète. Les symptômes des empoisonnements au CO sont notamment des maux de tête, des étourdissements, des nausées et de la confusion, et il est possible que le CO soit mortel à des concentrations élevées. Une bonne ventilation, un entretien régulier et la surveillance des taux de CO peuvent aider à prévenir le risque de toxicité lié au CO dans les fours industriels [51].

II.6.10. Erreur humaine

L'erreur humaine est un autre facteur qui peut contribuer aux risques associés à tout fonctionnement d'un four industriel. Les travailleurs qui utilisent ou entretiennent les fours peuvent commettre des erreurs qui entraînent des accidents, par exemple en ne respectant pas

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

les procédures de sécurité appropriées ou en interprétant mal les instructions d'utilisation. Les erreurs humaines qui peuvent entraîner des accidents dans les fours sont les suivantes :

- ✓ Arrêt ou isolement inadéquat du four avant d'effectuer des travaux d'entretien ou de réparation.
- ✓ Mauvaise interprétation des instructions d'utilisation ou manque de connaissance des risques liés à l'utilisation du four.
- ✓ Manipulation inadéquate du matériel ou de l'équipement, par exemple surcharge du four ou usage de composants endommagés ou défectueux.
- ✓ Ne pas utiliser l'équipement de protection individuelle (EPI) approprié ou ne pas suivre les procédures de sécurité adéquates, par exemple ne pas porter de gants ou d'autres équipements de protection [52].

II.6.11. Brûlure et autre type de blessure

Les fours industriels fonctionnant à des températures extrêmement élevées, les personnes qui entrent en contact avec ces appareils peuvent subir des brûlures ou d'autres blessures. Le contact direct avec des surfaces chaudes ou l'exposition à la chaleur rayonnante peuvent tous deux entraîner des brûlures [53].

II.7. Aperçu sur différents types de barrières de sécurité utilisées en milieu industriel

Une barrière de sécurité est mise en place pour protéger les personnes, l'environnement et les biens contre les risques dans les zones potentiellement dangereuses. Différents termes aux significations similaires (barrière, couche de protection, élément critique pour la sécurité, etc.). La figure II.5 ci-dessous montre les types de barrières de sécurité.

Il existe trois types de barrières de sécurité [54], sont :

- ❖ Les barrières techniques.
- ❖ Les barrières humaines.
- ❖ Les barrières à action manuelle de sécurité (BAMS) ou barrières organisationnelles.

II.7.1. Barrières techniques de sécurité

Barrière technique de sécurité (BTS) : ensemble d'éléments techniques nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité. On les appelle aussi des Mesures de Maîtrise des Risques

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

(MMR). En ce qui concerne les barrières de sécurité techniques, il peut y avoir des dispositifs de sécurité (passifs ou actifs) ou de barrières instrumentées de sécurité (BIS) [58].

II.7.1.1. Dispositifs de sécurité (passifs)

Les dispositifs de sécurité passive sont destinés à limiter les risques d'accident, tels que les barrières physiques.

Les barrières physiques : Les barrières de sécurité physiques sont un élément couramment utilisé dans les milieux industriels pour empêcher toute personne non autorisée d'accéder à des zones dangereuses. Il s'agit généralement de structures physiques qui bloquent une zone particulière et en empêchent l'entrée ou la sortie. On trouvera ci-après quelques exemples de barrières physiques qui sont fréquemment utilisées dans le secteur industriel :

- ✓ **Les clôtures de sécurité** : sont un type de barrière physique fréquemment utilisé dans les zones extérieures. Elles peuvent être constituées de nombreux matériaux différents, notamment le métal, le bois et le vinyle. Les clôtures peuvent être utilisées pour empêcher l'accès à des zones potentiellement dangereuses, telles que les bacs de stockage, les équipements de traitement ou les zones où des travaux d'entretien sont effectués ou les zones où des machines lourdes sont utilisées.
- ✓ **Les murs** : sont un type de barrière physique qui peut être installé pour empêcher l'accès à une zone. Ils sont généralement construits en béton, en briques ou en parpaings. Les murs sont souvent utilisés pour interdire l'accès aux zones où sont stockés des produits chimiques dangereux ou des équipements qui pourraient mettre en danger les employés comme les murs anti-souffle destinés à protéger contre les explosions et les incendies, ils sont placés stratégiquement autour des zones clés de la raffinerie, telles que les unités de traitement et les bacs de stockage.
- ✓ **Barrières de confinement** : Les barrières de confinement sont utilisées pour contenir les déversements ou les fuites provenant de réservoirs de stockage ou d'équipements de traitement. Elles sont généralement fabriquées en béton ou en acier et sont conçues pour empêcher le rejet de matières dangereuses dans l'environnement.
- ✓ **Les portails** : Les portails sont un type de barrière physique couramment utilisé avec les clôtures ou les murs. Ils peuvent être verrouillés pour empêcher l'accès non autorisé à des zones dangereuses. Le métal, le bois et le vinyle sont des matériaux couramment utilisés pour les portails.

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

- ✓ **Les barricades :** sont des barrières physiques utilisées pour fermer temporairement une zone. Elles sont couramment utilisées pour empêcher l'accès à des zones dangereuses sur des chantiers de construction ou lors d'événements publics.
- ✓ Les barrières physiques sont un élément important d'un programme détaillé de sûreté industrielle. Elles contribuent à la prévention des accidents et des blessures en limitant l'accès aux zones dangereuses en protégeant les équipements contre les dommages, en contenant les déversements ou les fuites, et en assurant la sécurité des personnes.

Barrières visuelles : Ces dispositifs préviennent les personnes des dangers potentiels. Les cônes, le ruban adhésif de sécurité et les panneaux d'avertissement sont quelques exemples de barrières visuelles. Ces barrières sont fréquemment utilisées dans les endroits où les barrières physiques ne sont pas pratiques ou ne peuvent pas être placées.

Les barrières coupe-feu : dans les endroits où des incendies peuvent se produire, comme les raffineries de pétrole, les usines chimiques et les centrales électriques, les barrières coupe-feu constituent une mesure de sécurité cruciale. En créant une barrière physique entre le feu et les zones voisines, elles sont destinées à arrêter la propagation de l'incendie. Divers matériaux, dont le béton, la brique, l'acier et l'isolation résistante au feu, peuvent être utilisés pour construire des barrières coupe-feu. L'utilisation et le niveau de résistance au feu requis déterminent le type de matériau utilisé. En plus des barrières physiques, les barrières coupe-feu peuvent également comprendre des portes coupe-feu, des registres coupe-feu et des vitrages résistants au feu.

Ces éléments sont conçus pour limiter la propagation du feu par les baies de la barrière, telles que les portes, les événements et les fenêtres. L'efficacité des barrières coupe-feu en cas d'incendie doit être assurée par des tests et un suivi de qualité. Pour ce faire, il faut vérifier si les barrières sont endommagées, s'assurer que les joints sont intacts et tester les portes et les clapets coupe-feu pour s'assurer qu'ils se ferment correctement. En général, les barrières coupe-feu représentent une mesure de sécurité cruciale dans les industries à risque d'incendie. Elles sont essentielles pour stopper la propagation du feu et protéger les personnes et les biens [55,56, 57].

II.7.1.2. Dispositifs de sécurité actifs

Les dispositifs actifs qui utilisent des dispositifs mécaniques (ressort, Levier...) pour assurer leur fonction. Cette catégorie comprend notamment Les soupapes de décharge et les limiteurs de débit. Les dispositifs actifs sont conçus pour détecter et arrêter rapidement les accidents lorsqu'ils se produisent, tels que les systèmes de détection et d'arrêt d'urgence [58].

II.7.1.3. Barrières instrumentées de sécurité (BIS)

Les barrières instrumentées de sécurité sont composées d'une chaîne de traitement comportant une entrée sous forme d'information (capteur, détecteur, etc.), un système de traitement (automate, ordinateur, relais, etc.) et une action (actionneur avec ou sans intervention d'un opérateur) et des moyens de communication (analogiques, numériques, tout ou rien) pour réaliser une fonction de sécurité [58]. La figure suivante montre une représentation schématique d'un BIS.



Figure II.11. Représentation schématique d'un BIS [58]

II .7.2. Barrières à action manuelle de sécurité (BAMS)

Les barrières à action manuelle de sécurité sont des barrières à caractère mixte, à la fois technique et humain : l'opérateur interagit avec les éléments techniques du système de sécurité qu'il surveille ou sur lesquels il intervient. Par exemple, une vanne de sécurité peut être placée en position de sécurité en activant manuellement un bouton d'arrêt d'urgence suite à la détection d'une fuite de gaz lors d'une visite de surveillance [58]. On peut citer comme exemple les barrières de verrouillage/étiquetage.

II.7.2.1. Barrières de verrouillage/étiquetage

Les barrières de verrouillage et d'étiquetage sont essentielles pour la sécurité sur le lieu de travail, ces barrières sont utilisées pour empêcher le démarrage ou la libération involontaire d'énergie dangereuse. Pour que les travailleurs puissent entretenir ou réparer les équipements en toute sécurité, Ces barrières sont utilisées pour s'assurer que les sources d'énergie sont coupées ou isolées. Elles sont généralement constituées d'interrupteurs, de vannes ou d'autres types de commandes verrouillables qui permettent d'empêcher la mise en marche de matériel jusqu'à ce que la maintenance ou les réparations soient effectuées.

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

Dans le monde du raffinage, les gros équipements tels que les pompes, les compresseurs et les réacteurs sont souvent équipés de barrières de verrouillage et d'étiquetage. Ces barrières peuvent être intégrées à l'équipement lui-même ou être ajoutées en tant que composants distincts lors des travaux d'entretien ou de réparation. À titre d'exemple, une barrière de verrouillage/étiquetage peut être un interrupteur verrouillable qui permet d'empêcher la mise en service d'une pompe jusqu'à ce que les travaux d'entretien soient réalisés et que le dispositif de verrouillage soit retiré. Les barrières de verrouillage et d'étiquetage constituent une mesure de sécurité essentielle dans le secteur des raffineries et contribuent à réduire considérablement la probabilité d'accidents et de blessures.

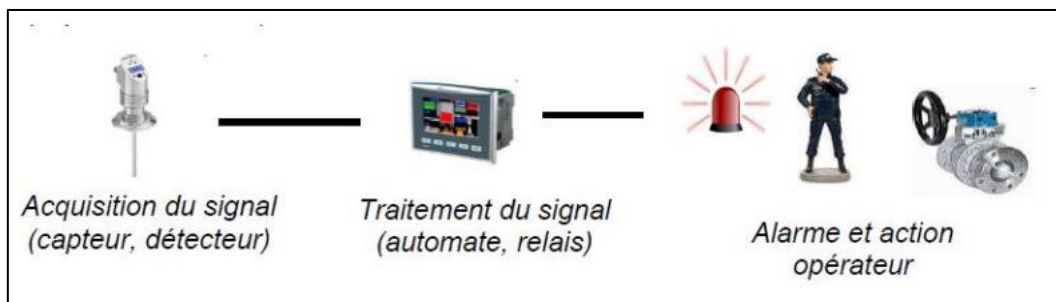


Figure II.12. Représentation schématique d'un BAMS [58]

II.7.3. Barrières humaines de sécurité

Les barrières de sécurité humaine sont constituées d'une activité humaine (une ou plusieurs opérations) qui s'oppose à la succession d'événements qui pourraient conduire à un accident [58].

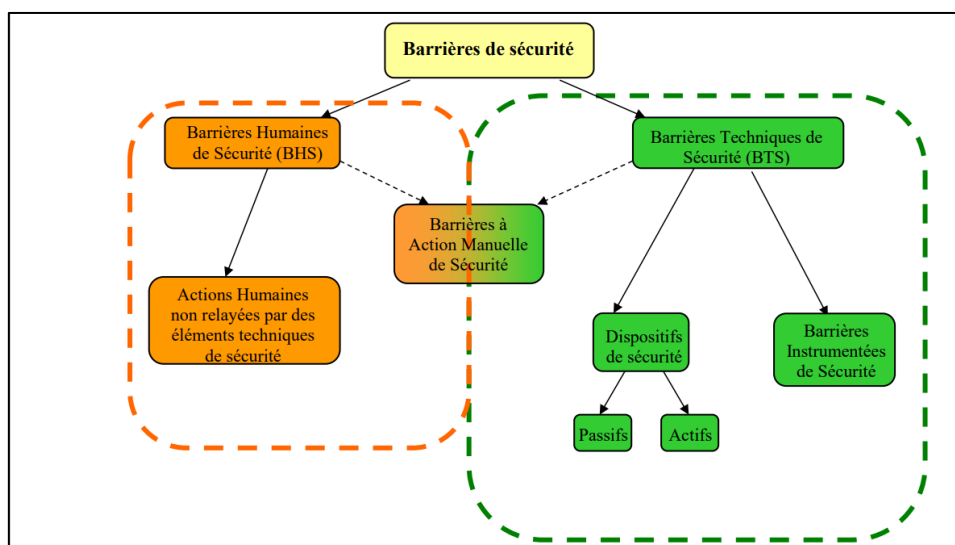


Figure II.13. Typologie des barrières de sécurité [58]

II.8. Mesures préventives mises en place pour prévenir des accidents de fours industriels

Il est essentiel de créer des recommandations pour améliorer la sécurité et prévenir les accidents à l'avenir après avoir déterminé les causes principales des accidents et les types de barrières de sécurité qui auraient pu les empêcher de se produire.

L'amélioration de la conception des fours et des équipements, l'installation de barrières de sécurité, l'identification et la correction des erreurs humaines, l'élaboration de procédures de sécurité et la formation du personnel sont quelques exemples de mesures préventives.

Afin d'identifier rapidement les conditions dangereuses ou les défaillances du système, les mesures préventives peuvent également inclure l'installation de systèmes de surveillance et de détection, tels que des capteurs de gaz ou des caméras thermiques. De plus, mettre en place un programme de maintenance régulier pour les fours industriels afin d'assurer un bon fonctionnement et une détection précoce de toute défaillance ou problème susceptible de survenir. Il existe des mesures visant à prévenir et à réduire les risques potentiels liés aux fours industriels :

II.8.1. Les instruments de contrôle

Comme les instruments de contrôle des fours permettent de contrôler en temps réel les paramètres de service (température, pression, débit, etc.) et de détecter les écarts par rapport aux valeurs optimales, ils peuvent être considérés comme des mesures préventives. En cas de dépassement des seuils de sécurité, ces instruments de contrôle peuvent être équipés d'alarmes visuelles et sonores qui alertent les opérateurs par exemple l'indicateur de sécurité de la température, de la pression et du débit.

En outre, lorsque des anomalies sont détectées, certains instruments de contrôle sont programmés pour assurer des arrêts automatiques ou prendre des mesures correctives. Par exemple, un capteur de pression peut déclencher une soupape de sûreté pour évacuer la pression supplémentaire, ou un capteur de température pourrait être en mesure de couper l'alimentation électrique en cas de dépassement d'une température critique fixée à l'avance.

D'autres instruments de contrôle importants pour la sécurité et la performance du four, tels que l'analyseur d'oxygène, le registre et l'opacimètre, sont déjà fixés sur le four. Ces éléments ont été présentés dans le chapitre précédent.

II.8.2. Détection d'incendie

Les systèmes de détection d'incendie doivent être mis en place lorsque l'on estime que le développement d'un incendie constitue une menace potentielle pour une installation. Le système de détection d'incendie doit être conçu pour :

- ❖ Une détection précoce des incendies.
- ❖ Activer des actions de prévention ou d'arrêt à un stade précoce afin d'atténuer les conséquences.
- ❖ Avertir le personnel du risque imminent.
- ❖ Activer le système ESD « Emergency shut down (arrêt d'urgence) » : un arrêt ESD est activé en cas de problème majeur survenu dans une installation : dans ce cas, il s'agit du niveau de sécurité le plus élevé. Cette opération a pour but de mettre tout ou partie de l'installation en dépressurisation, contrôlé au moyen d'un automate de sécurité. Il s'agit d'un ensemble de systèmes automatisés capables d'interrompre le circuit du produit en mettant en arrêt par exemple les machines tournantes (pompes, compresseurs, etc.)
- ❖ Mettre en place les systèmes appropriés de lutte et de protection contre l'incendie.

Des détecteurs de température, de fumée et de flamme doivent être considérés, en fonction de la nature de l'incendie devrait être détecté et l'environnement dans lequel sont situés les détecteurs.

II.8.2.1. Détection de flamme

Un autre élément de contrôle crucial pour la sécurité du four est le détecteur de flamme. Il s'agit d'un type de capteur capable de détecter et de réagir à la présence d'une flamme. Ces outils peuvent également identifier un incendie en fonction du mouvement de l'air et de la température. Les détecteurs de flammes peuvent donner l'alerte en moins d'une seconde car ils utilisent la technologie des ultraviolets (UV) ou des infrarouges (IR) pour identifier les flammes. Selon la manière dont il a été installé, le détecteur de flammes réagit à la présence d'une flamme, par exemple en déclenchant une alarme, en désactivant la conduite de carburant ou en activant un système d'extinction d'incendie.

II.8.2.2. Détection de gaz inflammable.

La sécurité d'un four industriel peut être assurée à l'aide d'un détecteur de gaz. Il identifie l'existence de gaz toxiques ou inflammables. Pour éviter une explosion ou un empoisonnement des travailleurs, le détecteur peut déclencher une alarme ou couper l'alimentation en gaz s'il

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

détecte une concentration de gaz dangereuse. Les détecteurs de gaz permettent de suivre les dégagements de gaz du four et aider à modifier les paramètres de fonctionnement afin de réduire les émissions de polluants.

II.8.3. Système de protection contre l'incendie

Le système de protection contre l'incendie doit être construit de façon à ce que, une fois la détection de l'incendie confirmée, il soit activé au début du processus d'élimination des sources de combustible et /ou d'éteindre ou à maîtriser le feu, cela permet d'éviter l'aggravation de la situation d'urgence.

II.8.3.1. Protection incendie active

La protection incendie active comprend tous les moyens d'extinction d'incendie (tels que les systèmes fixes, mobiles ou portables) utilisés en réponse à une détection automatique ou manuelle d'incendie. Le choix des moyens et agents d'extinction d'incendie dépend de la nature de l'incendie, de son évolution probable et du mode de propagation envisagé. Il existe différentes formes de protection active contre l'incendie, à savoir :

❖ Réseau de lutte contre-incendie

Le système de lutte contre l'incendie doit être constitué d'un système maillé et tous les éléments doivent être facilement accessibles et utilisables en cas de danger ou d'urgence. La mise en place d'un réseau de lutte contre l'incendie peut contribuer à réduire ce risque en mettant en place un système anti-incendie efficace et en permettant une intervention rapide en cas de feu. Des équipements d'extinction appropriés, tels que des systèmes de gicleurs, peuvent être installés à des endroits stratégiques autour du four industriel afin d'assurer une couverture complète et efficace en cas d'urgence.

❖ Système anti-incendie à eau

Les systèmes d'extinction agissent par inondation, arrosage, brumisation ou vaporisation. L'équipement à protéger et le niveau de protection souhaité doivent être pris en considération lors de la définition de la méthode d'application de l'agent extincteur (extinction ou refroidissement).

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

❖ Système anti-incendie à gaz (CO₂, N₂, Ar ...)

En utilisant des gaz inertes comme l'argon ou l'azote pour éteindre les incendies, les systèmes d'extinction au gaz réduisent la teneur en oxygène de l'air. Ils sont particulièrement adaptés à la protection des locaux contenant des installations sensibles et d'une valeur importante.

L'atmosphère contient naturellement de l'argon et de l'azote. Ils ne conduisent pas non plus l'électricité et sont par ailleurs sans danger pour la santé.

❖ Système anti-incendie à poudre

Les poudres d'extinction employées sont des agents d'extinction extrêmement rapides et efficaces. Le pouvoir d'extinction tridimensionnel instantané du nuage de poudre est basé sur l'effet d'étouffement et l'effet d'inhibition, une forme d'intervention chimique dans le phénomène de combustion.

Le système anti-incendie à poudre et le système anti-incendie à mousse peuvent s'appliquer à la protection incendie des fours industriels, mais il est important de tenir compte des risques potentiels liés à l'utilisation de ces agents d'extinction, car ils peuvent endommager les équipements électriques et électroniques. Il est recommandé de procéder à une analyse approfondie des risques afin de déterminer le système d'extinction le plus adapté au four, en tenant compte des spécificités du site et des risques qui peuvent y être associés.

II.8.3.2. Protection Incendie Passive

Afin de prévenir et/ou de réduire les risques de montée en température et d'effondrement en cas d'exposition des équipements et des structures à des flammes au-delà de leur limite maximale, des mesures de protection passive sont prises pour les protéger. Ces mesures sont principalement basées sur l'inertie thermique comme par exemple le choix de matériaux résistants au feu pour la construction du four, la construction de murs coupe-feu pour limiter la propagation des flammes. D'autres mesures, telles qu'une isolation thermique adéquate et des systèmes de ventilation et de désenfumage appropriés, peuvent également être nécessaires pour protéger les travailleurs et les installations situées à proximité en cas d'incendie. La protection passive contre l'incendie est un élément important de la sécurité incendie, mais pour assurer une protection complète, il faut y ajouter des systèmes de protection active contre l'incendie, tels que des systèmes d'extinction automatique à eau, à gaz ou à poudre.

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

Qu'ils soient actifs ou passifs, les systèmes de protection contre l'incendie sont considérés comme des mesures de prévention et d'extinction des incendies. Leur but est de localiser et d'éteindre rapidement un début d'incendie, de limiter sa propagation et d'évacuer les fumées pour faciliter à la fois l'évacuation des personnes et la protection des biens.

II.8.4. Autre mesure de protection contre l'incendie

Il est possible de réduire le danger de voir les travailleurs se blesser en utilisant des systèmes de vidéo surveillance pour contrôler à distance le fonctionnement du four.

Suite à un accident, la mise en place de barrières de sécurité peut s'avérer encore plus cruciale pour prévenir de futurs accidents. Les barrières physiques doivent être renforcées et des barrières supplémentaires doivent être mises en place pour assurer la protection des travailleurs contre les dangers spécifiques identifiés au cours de l'enquête sur l'accident.

Il est essentiel d'examiner les erreurs humaines qui ont causé l'accident et de prendre des mesures de sécurité pour les éviter à plus long terme. Il est possible de former les membres du personnel aux procédures de sécurité, d'identifier les activités à haut risque et de prendre des mesures de sécurité supplémentaires pour réduire les risques associés à ces activités. Le maintien d'un lieu de travail sûr passe par la création d'une culture de la sécurité et par l'implication du personnel dans la mise en œuvre des mesures de sécurité.

II.9. Normes et réglementations pour la sécurité des fours industrielles

En plus du retour d'expérience des accidents de fours, les réglementations et les normes de sécurité des fours sont aussi des éléments clés pour assurer la sécurité des installations et du personnel.

Suite aux accidents mondiaux très importants dans le domaine du pétrole et du gaz, on cite le cas de petit-couronne (décembre 2005), celui de Skikda (janvier 2013), et de Wisconsin (Décembre 2018), accident de Venezuela (août 2012) et plusieurs d'autres ; ceci a fait l'objet de l'évolution de plusieurs textes normatifs et réglementaires national et international pour une meilleure gestion et maîtrise des risques en milieu industriel.

II.9.1. Norme internationale

Au nombre de ces réglementations on peut citer la directive européenne sur les équipements sous pression, qui définit les normes de sécurité pour tous les équipements sous pression, notamment les fours industriels [60].

Il existe des normes spécifiques pour les fours, comme la NF EN 746-1, Les conditions de sécurité des fours industriels utilisés pour le traitement thermique des matériaux sont décrites dans la norme européenne NF EN 746-1. Afin d'assurer la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement, elle spécifie les exigences relatives à la conception, à la construction, à l'installation, au fonctionnement, à l'entretien des fours industriels. Tous les types de fours industriels, dont les fours électriques, les fours à gaz, etc, sont concernés par cette norme. Cette norme, qui est une référence dans le domaine de la sécurité des fours, est fréquemment mise à jour pour tenir compte des développements les plus récents en matière de technologie et de réglementation.

La sécurité des fours et autres machines de traitement thermique est régie par la norme NFPA 86. Elle a été créée par la société américaine National Fire Protection Association (NFPA) et définit des conditions de sécurité pour les fours utilisés dans différentes industries, telles que la production de métal, de verre, de céramique, de matériaux réfractaires, etc. La norme couvre les exigences de sécurité pour la conception, la construction, l'installation, le fonctionnement, la maintenance et la réparation des fours et des équipements de traitements thermiques.

II.9.2. Réglementation Algérienne

Les principaux textes réglementaires et législatifs algériens [61] pris en compte dans cette étude et relatifs à l'identification des dangers et à l'évaluation des risques industriels sont :

Loi n° 03-10 correspondant au 19 juillet 2003 : relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

Décret n° 03-451 du 1er décembre 2003 : définissant les règles de sécurité applicables aux activités portant sur les matières et produits chimiques dangereux ainsi que les récipients de gaz sous pression.

Instruction ministérielle « R1 » du 22 septembre 2003 : relative à la maîtrise et la gestion des risques industriels impliquant des substances dangereuses.

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

La norme algérienne NA 08-02 relative aux installations thermiques industrielles et de combustion.

Loi n° 04-20 correspondant au 25 décembre 2004 : relative à la prévention des risques Majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

Loi 13-01 du 19 Rabie Ethani 1434 correspondant au 20 février 2013 : modifiant et complétant la loi 05-07 du 28 avril 2005 relative aux hydrocarbures.

Instruction ministérielle « R2 » du Février 2005 : relative à la maîtrise des risques industriels et énergétique

Décret exécutif 14-349 du 15 Safar 1436 correspondant au 8 décembre 2014 : fixant les conditions de mise en conformité des installations et des équipements relevant des activités hydrocarbures

Décret exécutif 15-09 du 23 Rabie El Aouel 1436 correspondant au 14 janvier 2015 : fixant les modalités d'approbation des études de dangers spécifiques au secteur des hydrocarbures et leur contenu.

II.9.3. Référentiels de SONATRACH

SONATRACH dispose de ses propres normes de sécurité, parmi lesquelles nous pouvons mentionner le référentiel en rapport avec notre travail « Identification des Dangers et Evaluation des Risques HSE », a été développé pour décrire les exigences à suivre par les sites SONATRACH dans le but de mieux gérer les aspects de santé, de sécurité et d'environnement dans le cadre de l'évaluation des risques.

Ce référentiel recommande un ensemble de méthodes d'identification des dangers et d'évaluation des risques. Elle est basée sur un examen qualitatif et quantitatif. Ces méthodes doivent être appliquées de manière cohérente durant le cycle de vie d'une installation dans le cadre de la démarche de SONATRACH en matière de gestion des risques HSE.

Il est édité par la direction centrale HSE de SONATRACH (version mars 2019), il est valable pour toutes les structures du groupe SONATRACH.

II.10. Synthèse globale

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence l'importance sur comment les accidents de fours peuvent avoir lieu et les leçons qui ont été tirées ont permis d'améliorer la sécurité des fours. Nous avons commencé par décrire les étapes du retour d'expérience, qui comprennent la prise de données, l'analyse des causes principales, la proposition d'actions correctives et préventives.

Ensuite, nous avons présenté les différents types d'accidents qui pourraient survenir dans les fours, tels que les explosions, les incendies, les fuites de gaz et les effondrements structurels. Pour mieux comprendre, nous avons également présenté certains cas où les accidents de four se sont produits dans le monde.

Nous avons ensuite traité des différentes barrières de sécurité qui permettent de prévenir les accidents, telles que les barrières techniques, les barrières organisationnelles et les barrières humaines. Nous avons souligné la nécessité de mettre en place un système de gestion de la sécurité afin de garantir que toutes les barrières nécessaires sont en place et que leurs fonctionnements sont efficaces.

Nous avons également abordé les mesures correctives et préventives qui permettent effectivement de renforcer la sûreté des fours, telles que la sensibilisation du personnel, la maintenance préventive, les enquêtes de sécurité et l'analyse des risques. Enfin, nous avons présenté les réglementations et les normes liées à la sûreté des fours.

En résumé, nous avons constaté que le retour d'expérience et la mise en œuvre de mesures préventives permettent de réduire considérablement le nombre d'accidents de fours, ainsi que d'améliorer la sécurité des travailleurs et de préserver la qualité et la fonctionnalité de l'installation industrielle.

Un schéma II.6 décrivant les différentes étapes du retour d'expérience sur les accidents de four est présenté ci-dessous. Cela permet de donner un aperçu et de mieux comprendre les différents points abordés dans ce chapitre.

Chapitre II : Retour d'expérience sur les accidents de fours industriels, Identification des principaux risques associés et des barrières de sécurité utilisées

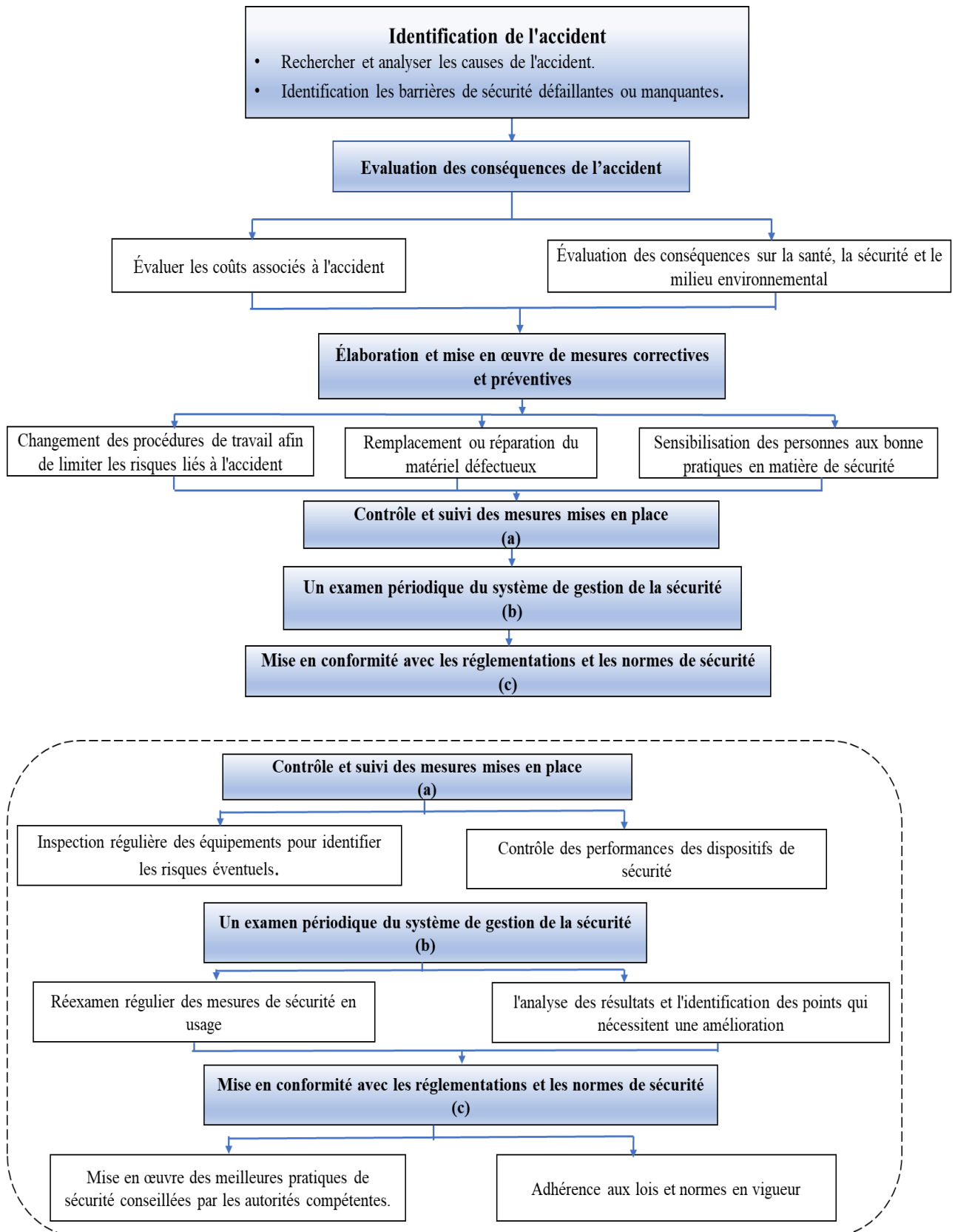


Figure II.14. Schéma récapitulatif le retour d'expérience sur les accidents de four, avec l'extension pour chaque section (a), (b) et (c).

II.11. Conclusion

En conclusion, les fours industriels représentent la source d'un grand nombre de risques pour l'environnement et les travailleurs. Afin de réduire ces risques, il est important que les sociétés qui utilisent des équipements de chauffage industriel mettent en place des mesures préventives adéquates. Ces mesures comprennent notamment une formation adaptée des travailleurs, l'entretien et l'inspection périodiques des équipements, la mise en place de systèmes d'alarme de sécurité, ainsi que des systèmes de ventilation efficaces, des barrières de sécurité, la surveillance régulière des instruments de contrôle et la correction des erreurs humaines. En fin, pour créer un lieu de travail sûr et protéger la santé et la sécurité des employés, la sensibilisation à la sécurité et l'engagement de toutes les parties concernées sont essentiels.

Chapitre III

Analyse par sûreté de fonctionnement : concepts et Revue de littérature

Sommaire du chapitre :

III.1. Introduction	72
III.2. Sûreté de fonctionnement des systèmes	73
III.2.1. Concept de la sûreté de fonctionnement	74
III.2.2. Principaux éléments de la Sdf.....	74
III.2.2.1. Fiabilité $R(t)$	75
III.2.2.2. Disponibilité $A(t)$	76
III.2.2.3. Maintenabilité $M(t)$	76
III.2.2.4. Sécurité	77
III.2.3. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement.....	77
III.2.4. Défaillance dans les procédés industriels	78
III.2.4.1. Taux de défaillance $\lambda(t)$	79
III.2.4.2. Taux de réparation $\mu(t)$	80
III.2.4.3. Le taux de défaillance à la sollicitation.....	81
III.2.5. Approche de la fiabilité par les probabilités : des modèles mathématiques pour mesurer et optimiser la performance des systèmes et des composants.	82
III.2.6. Quelques lois de probabilités courantes.....	83
III.2.6.1. Lois de probabilité en cas de variables aléatoires discrètes.....	83
III.2.6.2. Lois de probabilité en cas de variables aléatoires continues.....	83
III.3. Concept de système	84
III.3.1. Système et composant : définition, rôle et relation pour une fonction efficace.	84
III.3.2. Mode de fonctionnement d'un système	86
III.3.3. Fiabilité du système pour un fonctionnement efficace	86

III.3.3.1. Système série	87
III.3.3.2. Système parallèle	88
III.3.3.3. Redondance active et passive.....	88
III.3.4. Composants mécaniques du système : nécessité de prendre en compte la complexité des mécanismes de dégradation.....	89
III.3.5. Garantir la fiabilité tout au long du cycle de vie des systèmes.....	89
III.3.6. Modélisation de la fiabilité des systèmes.....	91
III.3.7. collecte de données et Bases de données pour l'analyse par sdf.....	91
III.4. Conclusion.....	92

III.1. Introduction

Dans les années 1950 et 1960, lorsque les systèmes techniques sont devenus plus complexes et essentiels à la sécurité des personnes et des biens, le concept de sûreté de fonctionnement a commencé à émerger. Les premières études sur la sûreté de fonctionnement ont été réalisées principalement dans les secteurs de la défense et de l'aéronautique, où la fiabilité et la sécurité étaient des priorités majeures.

La fiabilité d'un système peut être considérablement affectée par la défaillance d'un ou de plusieurs de ses composants. La défaillance d'un composant majeur peut entraîner des interruptions de service, des dégradations du matériel, des pertes pécuniaires et, dans le pire des cas, des blessés ou des morts [68]. C'est pourquoi une discipline appelée "sûreté de fonctionnement" a vu le jour dans le but d'évaluer et d'améliorer la fiabilité des systèmes. Elle s'intéresse particulièrement à la prévention des dysfonctionnements, à la détection précoce des anomalies, à la réduction de l'impact des incidents et à l'amélioration de la durabilité des systèmes.

En outre, la sûreté de fonctionnement prend en compte non seulement les défauts du matériel, mais aussi les erreurs commises par les humains, les défaillances des logiciels et d'autres éléments susceptibles d'avoir un impact sur la fiabilité d'un système.

On parle plutôt de " sûreté de fonctionnement ". Bien qu'il s'agisse d'un concept universel, il ne peut se résumer à un unique indice. Plusieurs paramètres ou indicateurs qui composent la sûreté de fonctionnement serviront à l'identifier (voir la figure 1) [68].

De nombreux modèles numériques, approches probabilistes et techniques d'analyse ont été développés sur la base du concept de sûreté de fonctionnement afin d'évaluer et d'améliorer la fiabilité des systèmes techniques. Ils sont essentiels pour une analyse approfondie dont l'objectif principal est de rendre le système le plus performant et le plus efficace possible tout en assurant un service et une sécurité de qualité en dépit du vieillissement, l'usure et les dégradations qui sont inévitables dans tous les systèmes techniques [69].

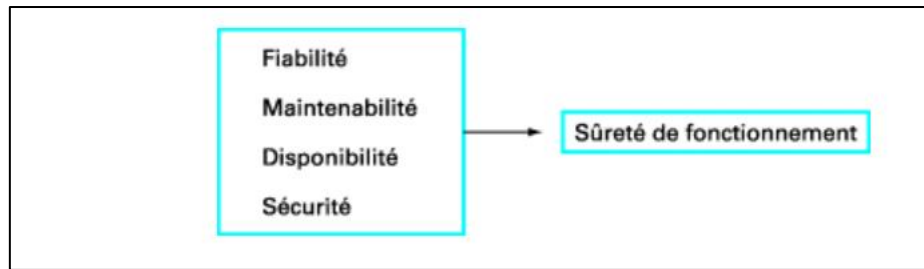


Figure III.1. Principaux éléments de la sûreté de fonctionnement [68]

Le domaine de la sûreté de fonctionnement utilise une variété de méthodes et de techniques pour évaluer et améliorer la qualité de fonctionnement des systèmes techniques. Il fait appel à des idées et à des méthodes issues de nombreuses sources différentes, dont l'ingénierie, les mathématiques, la physique, les statistiques et bien d'autres encore. Parmi les outils utilisés [70], citons :

- ✓ Les techniques d'analyse de risques.
- ✓ Logiciels de simulation au profit de la sûreté.
- ✓ Méthodes de calculs prédictifs de la sûreté de fonctionnement des systèmes
- ✓ Création de bases de données statistiques sur la fiabilité des différents composants.

En résumé, la sûreté de fonctionnement est une démarche multi-outils qui nécessite une approche systématique pour évaluer et améliorer la durabilité des systèmes techniques tout en tenant compte de la sécurité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la fiabilité.

Ce chapitre présente le cadre général de notre étude après avoir introduit le contexte historique du développement de la sûreté de fonctionnement. Nous discuterons des différents concepts et définitions nécessaires pour bien comprendre la sûreté de fonctionnement des systèmes, ainsi que des notions fondamentales qui y sont associées, telles que la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité.

III.2. Sûreté de fonctionnement des systèmes

La sûreté de fonctionnement a pour objectif ultime d'atteindre la perfection dans la conception des systèmes : aucun risque d'accident, aucun besoin d'arrêt, zéro défaut et même aucun besoin de maintenance ce qui n'est pas toujours le cas. Dans le contexte industriel, c'est une démarche inenvisageable, voire impossible à réaliser. La sûreté de fonctionnement est un domaine important dans le développement de tout système industriel dans lequel on propose

des méthodes pour mieux assurer la fiabilité et la sécurité d'un système de manière opportune et rentable.

III.2.1. Concept de la sûreté de fonctionnement

la sûreté de fonctionnement (Sdf) est un concept général qui se définit comme étant la science des défaillances [71,72,73,74,76], l'analyse des risques [75], ou encore connus sous le nom de fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité, ou bien le maintien de la qualité dans le temps [77].

La définition "Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité et Sécurité" que l'on retrouve dans l'acronyme FDMS, se réfère aux définitions de ces termes et met en évidence leur complémentarité. En effet, si la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité sont également des caractéristiques d'un système, la sûreté de fonctionnement ne se réduit pas à l'une de ces performances, elle se construit à partir de l'ensemble de ces composantes [71].

La définition "maintenir la qualité dans le temps" prend donc en compte le respect des exigences (explicites ou non). Elle a l'inconvénient d'impliquer qu'une activité de Sdf est nécessairement menée dans le cadre d'une démarche qualité, ce qui est tout à fait insuffisant [77].

La définition de la "science des défaillances" implique la connaissance, l'évaluation, la prédiction, la mesure et le contrôle des défaillances. Par conséquent, la sûreté de fonctionnement semble être davantage liée à la capacité d'un système à remplir ses fonctions dans des conditions données [71].

La définition de la Sdf sera donc considérée dans son ensemble comme une compilation de ces trois définitions. L'ensemble de ces définitions est conforme et fournit une vue d'ensemble plus précise de la Sdf à partir de différents points de vue.

III.2.2. Principaux éléments de la Sdf

La fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité sont des principales grandeurs de la sûreté de fonctionnement [72,77,78,79,80]. La prévision de la défaillance d'un système se base sur des critères probabilistes, tirés à partir de ces paramètres fondamentaux dans le but de déterminer les objectifs à atteindre par un système et d'évaluer la manière dont la qualité de service est prévue, pour identifier les points critiques nécessitant une amélioration [69].

III.2.2.1. Fiabilité $R(t)$

La fiabilité (Reliability, en anglais) est la capacité d'une entité (unité, équipement, installation...) à réaliser les fonctions requises dans des conditions données durant un temps donné. Elle est représentée par la probabilité $R(t)$ que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans les conditions données, durant l'intervalle de temps $[0, t]$, sachant que cette entité n'est pas en panne au moment 0.

$$R(t) = P[E \text{ non défaillant sur } [0, t]] \quad (\text{III-1})$$

On peut donc considérer que :

- $R(t)$: est une fonction décroissante qui varie de 0 à 1 sur l'intervalle $[0, +\infty [$
- $\lim_{t \rightarrow +\infty} R(t) = 0$
- La défiabilité $F(t)$. Elle est le complément à 1 de la fiabilité, est définie comme suit :

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (\text{III-2})$$

- La fiabilité est une fonction décroissante en fonction du temps (figure III.2), de telle sorte que : $R(t_1) > R(t_2)$ si $t_1 < t_2$.

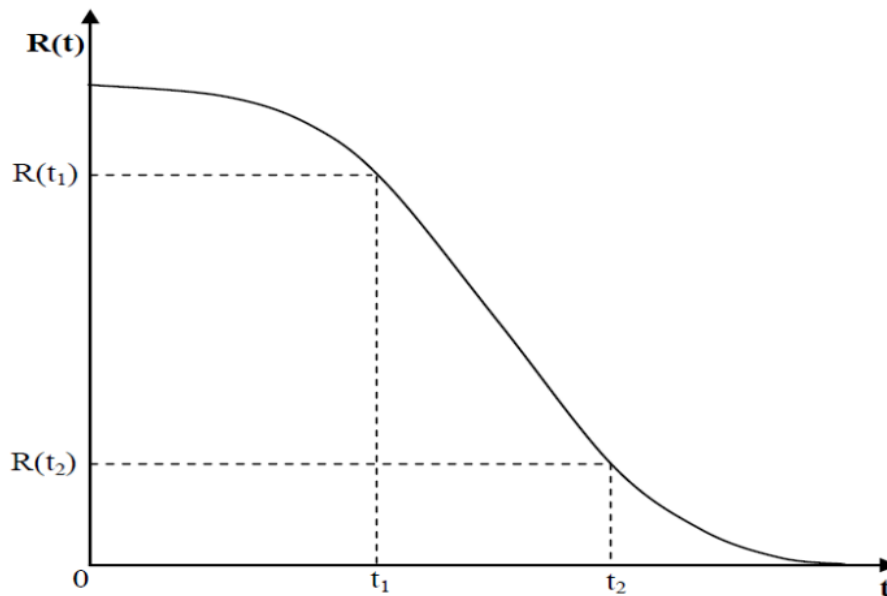


Figure III.2. Décroissance de la fiabilité en fonction du temps

La fiabilité des systèmes diminue avec le temps cette diminution s'accroît au cours de la phase de vieillissement des systèmes jusqu'à ce qu'elle soit annulée pendant de très longues durées ($t \rightarrow \infty$)

III.2.2.2. Disponibilité $A(t)$

La disponibilité [72,73] est la capacité d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données et à un moment donné. Elle est représentée par la probabilité $A(t)$ que l'entité E soit en état, à l'instant t , d'exécuter les fonctions requises dans des conditions données. La disponibilité et la fiabilité sont identiques si un composant est irréparable : $A(t) \sim R(t)$.par contre, s'il est réparable : $A(t) \geq R(t)$, la courbe de la fonction " $A(t)$ " (Availability, en anglais) est présentée dans la figure ci-dessous. L'indisponibilité $U(t)$ est le complément à 1 de la disponibilité, est définie comme étant :

$$U(t) = 1 - A(t) \quad (\text{III-3})$$

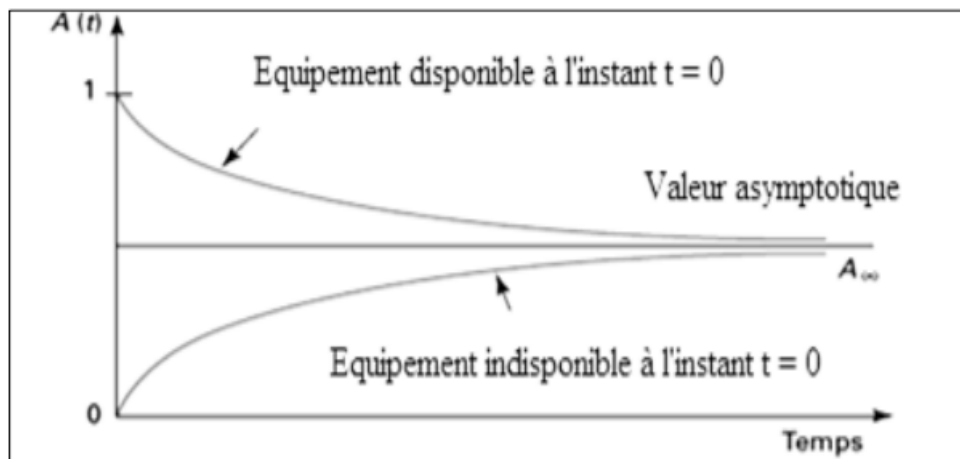


Figure III.3. Courbe de disponibilité d'un composant

Ce qu'il faut savoir sur la disponibilité :

La disponibilité d'un composant évolue avec le temps vers une valeur asymptotique. Pour les composants d'un système, cette valeur est d'autant plus faible que le système est en voie de vieillissement [86].

III.2.2.3. Maintenabilité $M(t)$

La maintenabilité [73 ,83,84] est la capacité d'une entité à être entretenue ou réparée dans un état qui lui permet d'accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données avec des procédures et des mesures prescrites. Elle est également représentée par la probabilité $M(t)$ que l'entité E soit en état, à l'instant t , d'exécuter ses fonctions, sachant que l'entité était en panne à l'instant 0.

- $M(t)$ est une fonction croissante qui varie de 0 à 1 sur l'intervalle $[0, +\infty[$
- $\lim_{t \rightarrow +\infty} M(t) = 1$

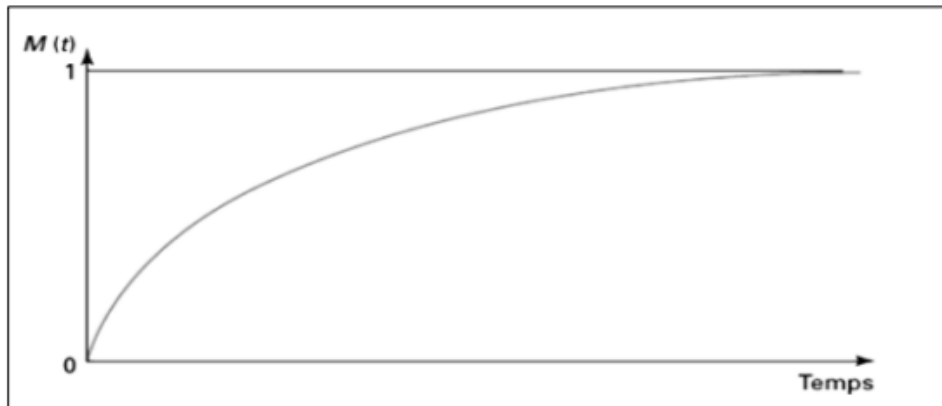


Figure III.4. Courbe de maintenabilité d'un équipement [85]

Ce qu'il faut savoir : La maintenabilité des équipements augmente de manière continue au fil du temps. Cependant, pour les équipements des installations pétro-gazières, cette croissance est lente en raison du facteur de vieillissement (fréquence des interventions de maintenance dû à l'âge avancé de l'équipement) [86].

III.2.2.4. Sécurité

La sécurité est un ensemble de conditions dans lesquelles des événements et les conditions critiques qui peuvent causer des dommages sont absents. Elle est, donc, le fait de ne pas être exposé à un danger. Elle est représentée par la probabilité $S(t)$ que l'entité E ne laisse pas survenir, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

$$S(t) = P [E \text{ évite des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t]] \quad (\text{III-4})$$

III.2.3. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement

Les mesures de probabilité peuvent être utilisées pour déterminer les grandeurs associées à la Sûreté de Fonctionnement. Ces grandeurs [69,73,74,86,87] représentent des durées moyennes comme indiquées ci-dessous

MTTF est la durée moyenne de fonctionnement jusqu'à la première défaillance « Mean Time To Failure », qui est représentée par l'expression suivante :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (III-5)$$

MTTR est la durée moyenne de réparation « Mean Time To Repair », qu'est représentée par l'expression suivante :

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)]dt \quad (III-6)$$

MUT est la durée moyenne de fonctionnement après réparation « Mean Up Time ».

MDT est la durée moyenne d'indisponibilité après défaillance « Mean Dawn Time ». Il s'agit du temps de détection de la défaillance, du temps de réparation et du moment de la remise en marche.

MTBF est la durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité ayant fait l'objet d'une réparation. « Mean Time Between Failure », qu'est représentée par la formule suivante :

$$MTBF = MDT + MUT \quad (III-7)$$

Ces durées sont représentées dans la figure III.15

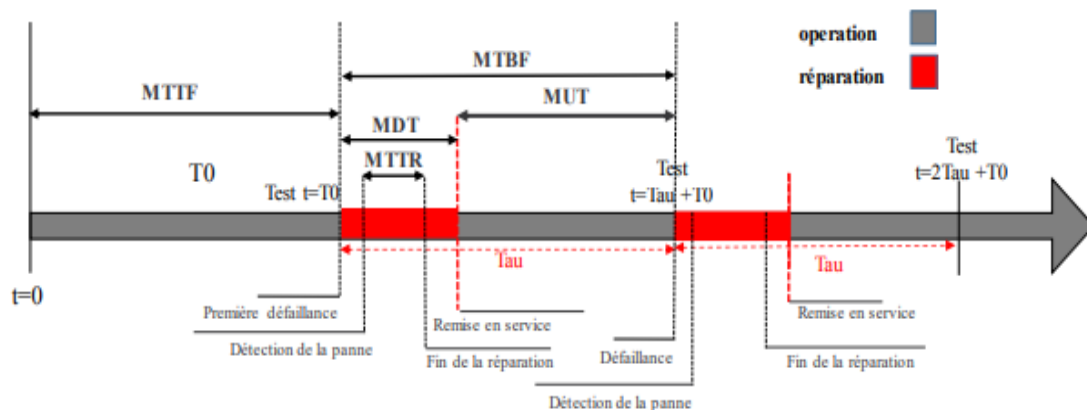


Figure III.5. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement [69]

III.2.4. Défaillance dans les procédés industriels

Une défaillance [88] peut être décrite comme un état où une entité ne remplit pas ses fonctions comme elle le devrait ou ne répond pas aux attentes. C'est le passage de l'état de marche à l'état d'échec. Il y a défaillance lorsque la capacité d'une entité à remplir une fonction requise est altérée, que ce soit complètement ou partiellement. Dans le cas d'une défaillance complète, l'entité ne peut plus du tout remplir sa fonction, ce qui constitue une panne. Dans le

cas d'une défaillance partielle, l'entité peut encore remplir sa fonction, mais avec des limitations et des capacités limitées, ce que l'on nomme un mode dégradé.

Les défaillances peuvent être momentanées, c'est-à-dire que le composant n'est pas en mesure de répondre à sa fonction pendant un certain temps, mais qu'il peut redevenir opérationnel sans nécessiter de réparation. D'autre part, les défaillances peuvent être permanentes, c'est-à-dire que le composant est totalement défectueux et qu'une intervention de maintenance est nécessaire pour le remettre en service.

lors de l'analyse de la défaillance d'un dispositif. Il s'agit de connaître sa cause, c'est-à-dire les événements qui ont conduit à la défaillance, ainsi que son mécanisme, autrement dit le processus qui a mené à la défaillance. En outre, il est important de tenir compte son taux $\lambda(t)$, qui reflète à la proportion de dispositifs qui ne sont plus en vie à $t + dt$ après avoir vécu un temps t .

III.2.4.1. Taux de défaillance $\lambda(t)$

Le taux de défaillance est une mesure de la fréquence des pannes d'un dispositif ou d'un système au cours d'une période donnée. En général, la probabilité de défaillance d'un composant est principalement déterminée par son âge, exprimé sous la forme d'un taux horaire. Ce taux est proportionnel à l'inverse du temps et reflète la probabilité que le composant tombe en panne dans l'intervalle de temps t à $t + dt$, étant donné qu'il a fonctionné jusqu'à l'instant t . En d'autres termes, plus le composant vieillit, plus la probabilité de défaillance augmente, et cette probabilité peut être estimée à l'aide du taux de défaillance horaire du composant.

En effet, selon le théorème des probabilités conditionnelles, et le théorème des probabilités totales, $\lambda(t)$ sera exprimé sous la forme suivante :

$$\lambda(t) \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \times P[\text{panne du composant } t \text{ et } t + \Delta t \text{ et pas de panne du composant entre } 0 \text{ et } t] \quad (\text{III-8})$$

En utilisant la probabilité conditionnelle, nous avons :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \times \frac{P[\text{panne du composant } t \text{ et } t + \Delta t \text{ et pas de panne du composant entre } 0 \text{ et } t]}{P[\text{pas de panne du composant entre } t \text{ et } t + \Delta t]} \quad (\text{III-9})$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \times \frac{P[\text{panne du composant } t \text{ et } t + \Delta t] - P[\text{panne du composant entre } 0 \text{ et } t]}{P[\text{pas de panne du composant entre } t \text{ et } t + \Delta t]} \quad (\text{III-10})$$

En introduisant la fiabilité $R(t)$, on obtiendra :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \times \frac{[(1 - R(t + \Delta t)) - (1 - R(t))]}{R(t)} \longrightarrow \lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \times \frac{[R(t + \Delta t) - R(t)]}{\Delta t \times R(t)} \quad (\text{III-11})$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{III-12})$$

La figure III.6 représente le taux de défaillance d'un composant au fil du temps.

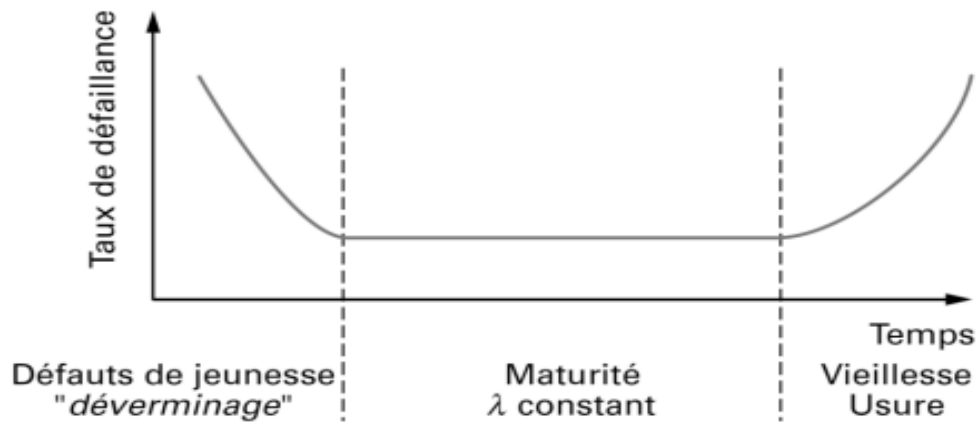


Figure III.6. Variation du taux de défaillance dans le temps : courbe en baignoire

La courbe en baignoire se caractérise par trois périodes : la première correspond à la période de jeunesse du composant, au cours de laquelle la probabilité de défaillance est relativement élevée en raison de la présence de défauts de conception ou fabrication. La seconde période, appelée durée de vie utile, est caractérisée par une probabilité de défaillance relativement faible et stable du fait que la plupart des défaillances dues aux défauts initiaux ont été corrigées et que le composant est réparé. La troisième période, appelée période de vieillissement, est définie par une augmentation progressive de la probabilité de défaillance en raison de l'usure des composants.

La courbe en baignoire est fréquemment utilisée pour étudier la fiabilité des systèmes et programmer la mise en place d'une maintenance préventive. Elle facilite la détermination du temps le plus propice au remplacement ou à la réparation d'un composant afin de diminuer le risque de panne.

III.2.4.2. Taux de réparation $\mu(t)$

Le taux de réparation [69,72,73,74,88,89] est la probabilité qu'un composant soit réparé en cas de défaillance. C'est le taux auquel les composants défaillants peuvent être réparés ou remplacés par de nouveaux composants pour remettre le système en état de marche. Le taux de réparation peut varier en fonction de l'âge du système ou du composant, ainsi que des conditions de maintenance et de fonctionnement. Il y a un certain temps d'arrêt avant que le composant puisse être réparé. Ce temps comprend le temps nécessaire à l'identification du problème ainsi

que le temps nécessaire à l'arrivée d'une équipe de réparation sur le site. Il y a également le temps de réparation proprement dit ainsi que le temps nécessaire pour remettre le composant en état de marche. $\mu(t)$ sera exprimé sous la forme suivante :

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \times P[\text{composant est réparé entre } t \text{ et } t + \Delta t \text{ sachant qu'il était en panne entre } 0 \text{ et } t] \quad (\text{III-13})$$

En introduisant la maintenabilité $M(t)$, on obtiendra :

$$\mu(t) = \frac{1}{1-M(t)} \cdot \frac{dM(t)}{dt} \quad (\text{III-14})$$

Le taux de réparation est un indicateur important pour la préparation de la maintenance corrective d'un système, car il aide à définir le temps nécessaire à la réparation ou au remplacement d'un composant défaillant. Il est aussi utile pour déterminer la disponibilité d'un système, c'est-à-dire le temps où il est opérationnel et disponible pour accomplir sa fonction.

III.2.4.3. Le taux de défaillance à la sollicitation

La fonction d'un composant peut être considérée comme continue sur une durée de temps, nommés temps de fonctionnement. Dans ce cas, les défaillances du composant sont caractérisées par le taux de défaillance $\lambda(t)$, qui détermine la probabilité de défaillance du composant durant une période de temps donnée.

La fonction à assurer, en revanche, peut être ponctuelle, c'est-à-dire qu'elle n'intervient que lorsque certains événements se produisent. Par exemple, un système de protection qui se déclenche lorsqu'un événement potentiellement dangereux se produit. Dans ce cas, le taux de défaillance à la sollicitation, noté $\gamma(t)$, caractérise les pannes du composant. Pour une unité de sollicitation donnée, ce taux mesure la probabilité de défaillance du composant lorsqu'il est sollicité [69].

Le taux de défaillance à la sollicitation s'applique aux composants qui sont exposés à des sollicitations ponctuelles ou intermittentes plutôt qu'à un fonctionnement continu, tels que les systèmes de protection, les dispositifs de déclenchement, les interrupteurs, les relais, etc. Il est essentiel de connaître le taux de défaillance à la sollicitation afin de pouvoir évaluer la fiabilité de ces composants et de leur assurer un bon fonctionnement lorsqu'ils sont sollicités.

Ce taux est défini comme étant un taux de défaillance sous la forme suivante :

$$\lambda(t) = \gamma(t) \cdot P[\text{composant est sollicité à } t] \quad (\text{III-15})$$

III.2.5. Approche de la fiabilité par les probabilités : des modèles mathématiques pour mesurer et optimiser la performance des systèmes et des composants.

L'approche probabiliste de la fiabilité repose sur le principe que les composants du système sont soumis à une période de mise en service afin d'éviter les défaillances "de jeunesse" et à une maintenance préventive afin d'éliminer les défaillances dues à l'usure. Par conséquent, les taux de défaillance et de réparation peuvent être considérés comme constants pendant le fonctionnement du système. En partant de ce principe, nous pouvons écrire :

- Le taux de défaillance $\lambda(t) = \lambda$ est constant pendant le cycle de vie du composant ou du système. Ce taux est la probabilité que le composant ou le système soit défaillant dans un laps de temps donné.
- Le taux de réparation $\mu(t) = \mu$ est aussi constant pendant le cycle de vie du composant ou du système. Ce taux correspond à la probabilité que le composant ou le système soit réparé dans un laps de temps donné.

En appliquant ces taux constants, des équations mathématiques telles que l'équation de la loi exponentielle ou la distribution de Weibull peuvent être utilisées pour décrire la fiabilité d'un système. En fonction de la durée de vie du système et des taux de défaillance et de réparation, ces équations peuvent être utilisées pour calculer la probabilité de défaillance d'un système ou d'un composant à un moment donné. Selon les concepts des parties §2.4.1 et §2.4.2 et les formules (III-12) et (III-14) on obtient des équations sous la forme suivante :

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{III-16})$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{III-17})$$

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \times e^{-(\lambda + \mu) \cdot t} \quad (\text{III-18})$$

$$U(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \times (1 - e^{-(\lambda + \mu) \cdot t}) \quad (\text{III-19})$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{III-20})$$

$$MDT = \frac{1}{\mu} \quad (\text{III-21})$$

Ensuite, Nous déterminons les valeurs asymptotiques de la disponibilité $A(\infty)$ et de l'indisponibilité $U(\infty)$.

$$A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad (\text{III-22})$$

$$U(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{MDT}{MTBF + MDT} \quad (\text{III-23})$$

En fonction de la définition des paramètres temporels, nous constatons que la disponibilité asymptotique représente la proportion de temps où l'entité est en état de marche, et que l'indisponibilité asymptotique représente la proportion de temps où l'entité est en panne. Il est prouvé que cette constatation est également applicable quand les paramètres temporels λ et μ ne sont pas constants.

Si le temps moyen de réparation est considéré comme négligeable vis-à-vis du temps moyen de fonctionnement, l'indisponibilité peut être exprimée de la manière suivante :

$$U(\infty) = \frac{\lambda}{\mu} \quad (\text{III-24})$$

III.2.6. Quelques lois de probabilités courantes

Les lois de probabilité sont utilisées tout à la fois dans le domaine de la fiabilité et de la maintenabilité pour modéliser le comportement des systèmes et des composants en termes de défaillance, de réparation et de maintenance. Selon la nature de la variable aléatoire examinée, les lois de probabilité peuvent être discrètes ou continues [73 ,83 ,88,89,90]. Le tableau III.1 présente les lois de probabilité.

III.2.6.1. Lois de probabilité en cas de variables aléatoires discrètes

Les lois de probabilité discrètes sont employées pour modéliser des valeurs aléatoires qui prennent des formes distinctes et isolées, comme le nombre de défaillances d'une entité ou le nombre de réparations réalisées sur un système dans un laps de temps donné, ou bien, sont notamment utilisés pour quantifier le défaut de réponse à une sollicitation, qui se produit en cas de refus d'une entité de changer d'état lorsqu'on lui demande de le faire [88]. La distribution de Poisson et la distribution binomiale sont des modèles de lois de probabilité discrètes.

III.2.6.2. Lois de probabilité en cas de variables aléatoires continues

Les lois de probabilité continues sont utilisées pour modéliser par exemple des variables aléatoires qui prennent n'importe quelle valeur dans un temps continu, comme la durée de fonctionnement d'une entité ou le temps écoulé entre deux pannes consécutives. La loi

exponentielle et la loi de Weibull sont des modèles de lois de probabilité continues. Pour plus d'informations sur ces derniers et leurs caractéristiques, veuillez-vous référer à l'annexe B

Tableau III.1. Différentes lois de probabilité [69,73,88].

Type de variables aléatoires	Nom de loi	Application
Discrète	Loi binomiale	Défaillance à la sollicitation
	Loi de Poisson	Défaillance à la sollicitation, lorsque le nombre d'expériences est élevé et quand l'espérance mathématique de la variable aléatoire est constante Continue
Continue	Loi de Weibull	Taux de défaillance décroissant, Croissant ou constant
	Loi exponentielle	Taux de défaillance constant
	Loi normale	Incertitude liée à des mesures, fabrication
	Loi Log-Normale	Données de maintenabilité et défaillances dues à la fatigue

En effet, en utilisant une loi de probabilité appropriée pour représenter le comportement d'une entité, il est désormais possible de prédire avec précision la probabilité d'une défaillance ou d'une réparation à un moment donné, ce qui permet ainsi d'optimiser la maintenance et les performances de l'entité.

III.3. Concept de système

III.3.1. Système et composant : définition, rôle et relation pour une fonction efficace

Un système [72,78,88,91,92] est un ensemble de composants interconnectés et en interaction qui agissent ensemble pour accomplir une fonction donnée. Les composants, pour

leur part, sont des éléments distincts et nécessaires du système, qui sont soit physiques, soit logiques, et qui servent à la fonction du système dans des conditions et dans un laps de temps donnés.

Pour chaque système, Il est essentiel de définir les différents éléments qui le font caractériser :

Il faut d'abord définir explicitement la fonction du système, autrement dit l'objectif pour lequel le système a été construit. Il faut ensuite identifier la structure du système, à savoir les différents éléments qui le constituent et leur interdépendance.

Il est aussi essentiel de prendre en compte les conditions de service du système, telles que les contraintes auxquelles il est exposé (température, pression, vibration, etc.). Pour assurer le bon fonctionnement du système, il faut également tenir compte des conditions dans lesquelles il est exploité, telles que les modes de démarrage, d'arrêt et de maintenance.

Enfin, l'environnement de fonctionnement du système doit être examiné. Il peut notamment s'agir de la corrosion, de l'humidité ou d'autres facteurs externes.

La fonction des composants du système sont également essentielles pour garantir la fiabilité du système. Chaque composant doit être identifié et classé en fonction de son usage, de ses performances, de son cycle de vie, de son taux de défaillance et de son taux de réparation.

Le fonctionnement correct du système dépend également de la façon dont les composants interagissent les uns avec les autres. Les défaillances d'un composant peuvent avoir un effet sur les autres, entraînant une défaillance générale du système. Par conséquent, une analyse des interactions entre les composants est absolument essentielle pour pouvoir assurer la fiabilité de l'ensemble du système.

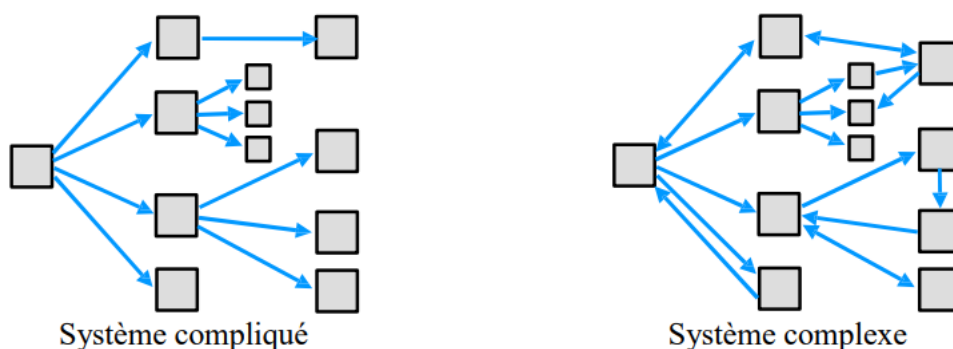


Figure III.7. Différence entre un système compliqué et un système complexe [69]

En raison de la nature des interactions entre les éléments qui le composent, un système peut se compliquer et donner lieu à l'apparition de nouvelles propriétés qui ne sont pas présentes dans les éléments eux-mêmes. La différence entre un système complexe et un système compliqué est que les deux peuvent avoir un grand nombre de composants comme le montre dans la figure III.7, cependant, dans un système compliqué, les relations entre les composants sont simples, de l'ordre de l'arborescence.

III.3.2. Mode de fonctionnement d'un système

Chaque système a une ou plusieurs tâches à effectuer. Les composants qui déterminent le mode de fonctionnement d'un système sont les suivants :

- Selon le type de système considéré, les fonctions à assurer peuvent être très diverses. Par exemple, les fonctions à assurer dans un système de transport public peuvent comprendre la sécurité des passagers, la ponctualité, le confort, etc. Les fonctions à assurer dans un système de production industrielle pourraient être la production de produits en fonction des demandes, la garantie d'une durée d'immobilisation moindre, la gestion de l'inventaire, etc.
- La structure du système et les interconnexions entre les différents éléments qui le composent : L'architecture du système peut être caractérisée de trois manières : fonctionnelle, organique et organisationnelle. La description fonctionnelle met l'accent sur la hiérarchie des fonctions opérationnelles, la description organique met l'accent sur la décomposition des constituants jusqu'aux composants physiques les plus élémentaires et la description organisationnelle met en valeur les aspects hiérarchiques et relationnels du système.
- Le système de contrôle-commande cela permet de définir le système qui assure la gestion et le suivi des fonctions du système. Ceci inclut les réponses aux événements tels que les défaillances, les systèmes d'alarmes, les modes de secours, la maintenance, etc

III.3.3. la fiabilité du système pour un fonctionnement efficace

Pour les industriels, la fiabilité des systèmes est essentielle car elle leur permet de garantir la disponibilité et la performance des systèmes. La probabilité que le système reste opérationnel dans des conditions spécifiées pour une durée donnée est définie comme étant la fiabilité. Afin d'établir la fiabilité d'un système complexe, il convient de le décomposer en éléments

élémentaires, aussi connus sous le nom de sous-systèmes. Chaque composant fondamental possède sa propre loi de fiabilité ou de défaillance, qui désigne la probabilité de fonctionnement correct ou de panne dans un laps de temps donné. Une fois que la fiabilité associée à chaque composant élémentaire est déterminée, la fiabilité du système se déduit [69,78,88,89,93].

Un système complexe peut être configuré de différentes manières pour l'étude de la fiabilité. A moins que des mesures compensatoires ne soient mises en œuvre, la fiabilité du système diminue au fur et à mesure que sa complexité augmente (Redondance). La fiabilité de ces systèmes peut être déterminée par une modélisation fonctionnelle sous la forme d'un schéma bloc. Chaque bloc correspond à un composant ou à un mode de défaillance. Les configurations série, parallèle et série-parallèle sont les plus répandues. D'autres configurations sont possibles, notamment pour représenter une redondance ou un élément de secours (redondances actives m parmi n et redondances passives) [69 ,88].

Il est essentiel de souligner que la fiabilité du système peut être améliorée en sélectionnant des composants plus performants, en mettant en œuvre des plans de maintenance préventive ou en augmentant la redondance des éléments.

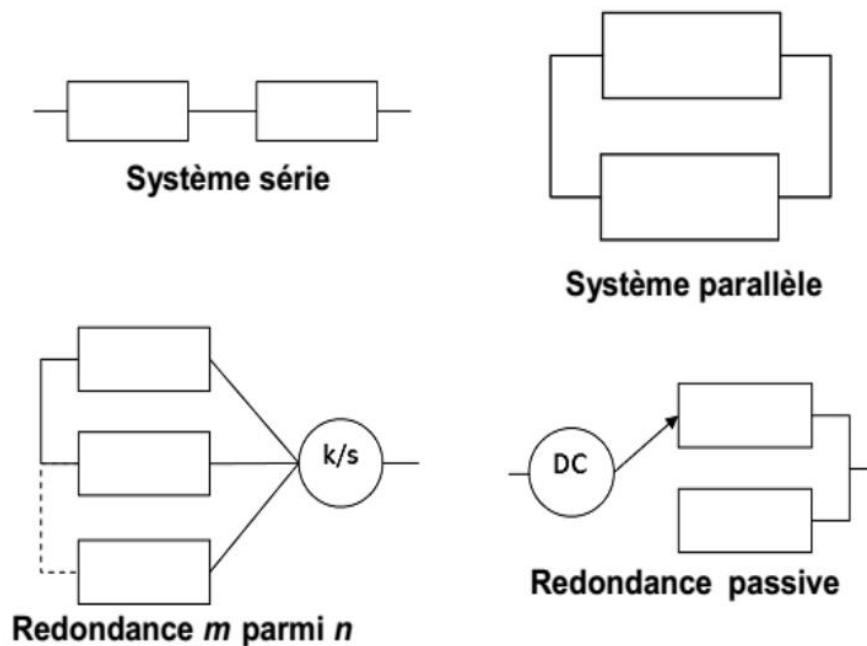


Figure III.8. Différentes configurations de système [88]

III.3.3.1. Système série

Dans la situation donnée, chaque composant est un élément essentiel au fonctionnement du système, et la défaillance de l'un d'entre eux finit par entraîner la défaillance du système dans son ensemble. La fiabilité du système est donc définie de la manière suivante :

$$R(t)_{\text{systeme}} = \prod_{i=1}^n R(t)_{\text{composant } i} \quad (\text{III-25})$$

La formule précédente permet de démontrer facilement l'expression du taux de défaillance du système en fonction des composants du système :

$$\lambda(t)_{\text{systeme}} = \sum_{i=1}^n \lambda(t)_{\text{composant } i} \quad (\text{III-26})$$

III.3.3.2. Système parallèle

Dans ce cas, le système a i composants, le système ne tombe en panne que si tous les composants sont défaillants. Le système comprend alors une ou plusieurs redondances.

La fonction de défaillance cumulée du système est alors exprimée en fonction de défaillance des composants :

$$F(t)_{\text{systeme}} = \prod_{i=1}^n F(t)_{\text{composant } i} \quad (\text{III-27})$$

La fiabilité du système est ainsi déduite :

$$R(t)_{\text{systeme}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R(t)_{\text{composant } i}) \quad (\text{III-28})$$

III.3.3.3. Redondance active et passive

Le principe de redondance des composants est une technique employée en ingénierie pour accroître la fiabilité d'un système en y incorporant des composants de secours ou de remplacement. Le concept consiste à inclure un ou plusieurs composants de secours qui peuvent intervenir en cas de panne d'un composant primaire.

La redondance active signifie que tous les éléments sont actifs en même temps et peuvent gérer la charge de travail. Dans le cas de la redondance passive, un seul des éléments est actif à un moment donné et les autres sont en attente, prêts à prendre le contrôle en cas de nécessité.

La redondance des composants est un autre moyen d'améliorer l'efficacité du système en utilisant des composants supplémentaires pour accroître la capacité ou accélérer le traitement ainsi que la disponibilité du système, en diminuant les risques de défaillance et en assurant la continuité du système.

III.3.4. Composants mécaniques du système : nécessité de prendre en compte la complexité des mécanismes de dégradation

Les composants mécaniques se dégradent par le biais de divers processus, notamment la fatigue, le fluage, la fissuration, l'usure, la corrosion/l'oxydation, la désagrégation et l'électromigration [94,95,96]. Des facteurs internes tels que les défauts des matériaux, les contraintes résiduelles ou les contraintes thermiques peuvent être à l'origine de ces processus de dégradation, tout comme des facteurs externes tels que des conditions environnementales dangereuses ou la durée d'utilisation excessive du composant.

La fatigue est définie comme étant la dégradation ou la modification des propriétés mécaniques des matériaux causée par une application répétitive d'un chargement cyclique ou d'une vibration, qui entraîne une défaillance. La fatigue est la cause la plus fréquente de défaillance des composants mécaniques, tels que les roulements à billes [88].

Le fluage, l'usure et la corrosion peuvent tous être atténués par un choix adéquat des composants et des traitements de surface. Les problèmes de fiabilité mécanique sont principalement causés par des contraintes élevées et des phénomènes de fatigue. Les structures et les processus mécaniques sont devenus plus complexes. Par le fait même, la fiabilité des structures et des systèmes mécaniques est de plus en plus complexe à analyser [88,94,95].

III.3.5. Garantir la fiabilité tout au long du cycle de vie des systèmes

Au cours du cycle de développement, de nombreux industriels s'efforcent d'évaluer et d'améliorer la fiabilité de leurs produits (systèmes) afin de faire progresser leur connaissance du rapport coût/fiabilité et de mieux cibler les causes de défaillance. La diminution de la fiabilité d'un produit est principalement liée aux processus de dégradation du système et/ou de ses composants précédemment évoqués. La fiabilisation d'un système (produit) nécessite l'utilisation de différentes méthodes et outils.

Les différents éléments de la fiabilité. Selon cette démarche, il existe trois formes fiabilité de :

- ✓ La fiabilité prévisionnelle
- ✓ La fiabilité expérimentale
- ✓ La fiabilité opérationnelle

Chaque phase fait appel aux méthodes et outils d'évaluation suivants (voir figure III.9) :

- ✓ **Évaluation prévisionnelle de la fiabilité** : cette étape consiste à étudier la fiabilité au moyen d'analyses qualitatives (HAZOP, AMDE, ...) et quantitatives (arbre de défaillances, arbre d'événements, ...), en intégrant diverses sources de données. Les simulations de Monte Carlo, les réseaux de Petri et les chaînes de Markov peuvent être utilisés pour modéliser la fiabilité de systèmes complexes. La fiabilité prévisionnelle permet une orientation optimale lors de la conception.
- ✓ **Évaluation expérimentale de la fiabilité** : cette phase a lieu dès que le développement du produit est suffisamment avancé et que les premiers prototypes sont disponibles, il est possible d'effectuer des tests de robustesse (également appelés "tests aggravés") en vue de connaître les faiblesses et les marges de conception. Une fois que le produit est mature (avec des marges suffisantes), une série d'essais peut être réalisée pour estimer la fiabilité. Les essais de déverminage sont utilisés lors de la production pour éliminer les défauts précoces « jeunesse » (dérive du processus, faiblesse d'un composant, etc.).
- ✓ **Évaluation opérationnelle de la fiabilité** : une fois le produit devenu opérationnel, une estimation de la fiabilité est établie sur la base des données de REX. Cette estimation est réalisée dès que le produit entre en service, ce qui permet de corriger les défauts de conception et de fabrication/réalisation.

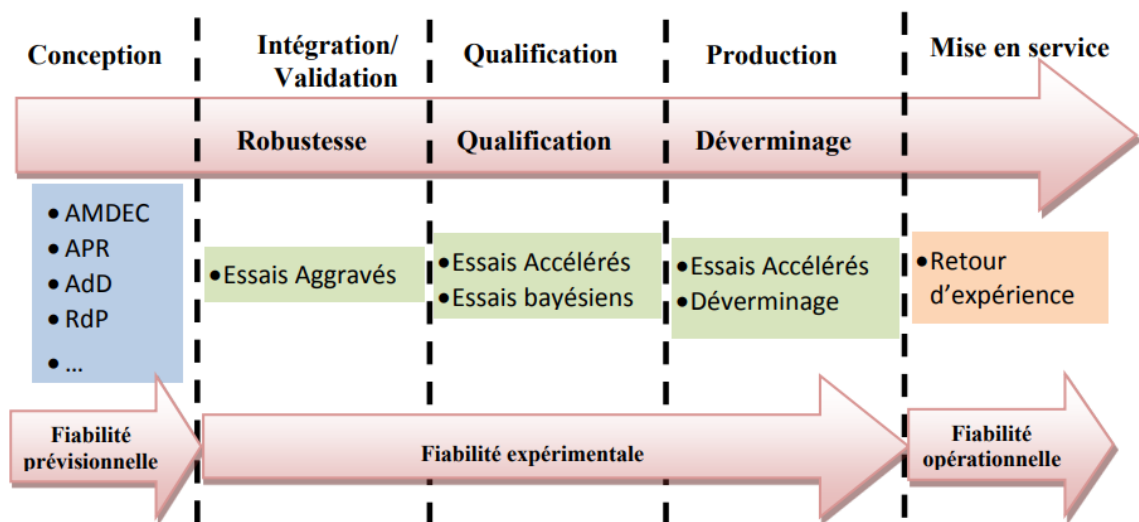


Figure III.9. Différentes méthodes et outils pour le processus d'élaboration de la fiabilité tout au long du cycle de vie d'un produit [88]

III.3.6. Modélisation de la fiabilité des systèmes

La modélisation de la fiabilité comprend l'élaboration d'un modèle mathématique qui représente le comportement du système dans le temps tout en tenant compte des divers modes de défaillance potentiels des composants et de la manière dont ils interagissent.

L'industrie est particulièrement intéressée par la fiabilité dans le but à la fois d'assurer le bon fonctionnement de ses systèmes et le suivi de leurs maintenances. Pour déterminer la fiabilité d'un système mécanique ou électronique, il faut d'abord connaître la loi de fiabilité (ou loi de défaillance) de chaque composant. Dans le cas des systèmes mécaniques, qui sont généralement complexes, la fiabilité du système est basée sur la fiabilité de certains composants élémentaires qui sont responsables de son mauvais fonctionnement, selon les résultats d'une étude qualitative (AMDE), qui sont appelés composants "responsables" ou "critiques" (parfois un seul), et qui contribuent presque entièrement à la probabilité de défaillance de l'ensemble du système.

La modélisation de la fiabilité des systèmes prédit la probabilité de défaillance du système dans des circonstances données, afin de prendre des décisions en toute connaissance de cause sur la réparation, l'entretien ou le retrait des composants ou sur le système pris dans son ensemble.

L'étude de fiabilité d'un avion est une bonne illustration de la modélisation de la fiabilité d'un système. Dans cet exemple, le système considéré correspond à l'avion lui-même, constitué de plusieurs éléments tels que les moteurs, les systèmes hydrauliques, les ailes, etc. Afin de modéliser la fiabilité de l'avion, il est possible de commencer par recueillir des données sur la fiabilité de chaque élément et de créer une liste de défaillances éventuelles pour chaque composant. La probabilité de défaillance de chaque élément du système, ainsi que la probabilité de défaillance de l'ensemble du système, peuvent alors être estimées à l'aide de méthodes statistiques. Les méthodes de modélisation permettent aussi de simuler le comportement du système dans diverses circonstances, telles que des conditions météorologiques sévères ou des défaillances de sous-systèmes spécifiques, afin d'identifier les points faibles du système et de trouver des solutions pour en améliorer la fiabilité [97].

III.3.7. collecte de données et Bases de données pour l'analyse par sdf

Plusieurs bases de données ont été créées au fil du temps sur la base des résultats d'exploitation, des résultats des tests en laboratoire et du retour d'expérience. La possession de

données sur la fiabilité ou la maintenabilité est une ressource très utile pour l'évaluation des risques. Une ressource pour l'évaluation des risques. Ces informations pourraient être uniquement disponibles pour le système ou être communes à d'autres systèmes.

Le processus de dégradation des équipements (modes de défaillance, mécanismes et causes), les conditions d'exploitation et l'évolution technologique sont autant de facteurs nécessaires au calcul des taux de défaillance et à l'élaboration de modèles prédictifs, des facteurs dont il est difficile de tenir compte dans leur totalité. Les données sont souvent inadaptées aux systèmes et environnements réels. Par conséquent, ces sources ne fournissent pas de données parfaites pour une évaluation plus précise de la fiabilité ; les informations collectées ne permettent qu'une exploitation partielle des données. Cependant, elles sont toujours nécessaires pour que les nouvelles conceptions puissent obtenir des valeurs rapprochées. Par ailleurs, l'une des bases de données utilisées pour la création de notre analyse est la base de données OREDA [98]. L'annexe B contient un certain nombre de bases de données dans différents domaines. Nous avons également donné les limites d'utilisation de ces bases de données.

III.4. Conclusion

Ce chapitre porte sur la littérature qui traite de l'analyse par sûreté de fonctionnement, une démarche incontournable pour renforcer le développement des systèmes industriels, au vu de la complexité accrue des systèmes et de leurs multiples usages, à la fois pour lutter contre l'insécurité, améliorer la disponibilité et garantir la fiabilité, et sans compter les aspects financiers à prendre en compte. Ce chapitre a couvert les différents aspects de la sûreté de fonctionnement des systèmes, en se focalisant sur des notions fondamentales à savoir la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité. Ensuite, une métrique de sûreté de fonctionnement a été présentée, décrivant les différentes étapes par lesquelles passe un composant, ainsi que le taux de défaillance et de réparation et l'approche de la fiabilité par les probabilités.

De plus, une partie importante a été consacrée aux concepts de système, qui décrivent comment le taux de défaillance d'un système mécanique complexe peut être calculé sur la base de ses composants et de leurs rôles respectifs dans le mécanisme de défaillance. Un exemple a démontré que la fiabilité du système dépend de la fiabilité de certains composants de base qui sont responsables de son dysfonctionnement au fil du temps. Les méthodes d'analyse de la fiabilité ont été abordées à chaque phase du cycle de vie du développement des systèmes

Chapitre III : Analyse par sûreté de fonctionnement : concepts et Revue de littérature

complexes. Elles forment un ensemble qui constitue une démarche à part entière : le processus de fiabilité

L'analyse de la fiabilité a été également abordé qui se décline selon trois composantes complémentaires : la fiabilité prédictive, la fiabilité expérimentale et la fiabilité opérationnelle ainsi que les recueils de données de fiabilité.

De nombreuses méthodes de diagnostic et de contrôle portant sur la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité des systèmes ont vu le jour dans le domaine de la sûreté de fonctionnement des systèmes. Ce chapitre donne un aperçu général de la sûreté de fonctionnement bien avant de présenter certaines de ces méthodes que nous jugeons utiles pour notre sujet de travail

Chapitre IV

Analyse des risques : démarches et méthodes de base du Sûreté de fonctionnement

Sommaire du chapitre :

IV.1. Introduction.....	96
IV.2. Analyse fonctionnelle du système.....	99
IV.3. Généralité sur les Méthodes d'évaluation des Risques.....	100
IV.3.1. Analyse qualitative / quantitative	100
IV.3.1.1. Méthodes qualitatives	100
IV.3.1.2. Méthodes quantitatives	101
IV.3.2. Analyse inductive / déductive.....	101
IV.3.2.1. Méthodes inductives	101
IV.3.2.2. Méthodes déductives	101
IV.3.3. Analyse statiques/dynamiques.....	102
IV.3.3.1. Méthodes statiques	102
IV.3.3.2. Méthodes dynamiques	102
IV.4. Analyse dysfonctionnelle : méthodes d'identification et d'évaluation des risques	103
IV.4.1. AMDE / AMDEC	104
IV.4.1.1. AMDE (Analyse des modes de défaillances, de leurs effets).....	104
IV.4.1.2. AMDEC (L'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité)	105
IV.4.2. HAZOP	107
IV.4.3. Arbre de défaillance.....	109
IV.4.3.1. Analyse qualitative	111
IV.4.3.2. Analyse quantitative	111

IV.4.4. Arbre d'évènement	114
IV.4.5. Nœud papillon	115
IV.4.6. Simulation de Monte Carlo.....	116
IV.4.7. Réseau de Petri	117
IV.4.7.1. Sémantique -exécution pour évaluer un réseau de pétri	119
IV.4.7.2. RdP stochastiques classique :	120
IV.4.7.3. RdP stochastiques généralisés :	120
IV.4.7.4. RdP stochastiques déterministes :.....	120
IV.4.8. Graphes de Markov	121
IV.4.9. Réseaux bayésiens	122
IV.5. Méthodes pour maîtriser les risques : limites et avantages	122
IV.6. Comment bien choisir une méthode d'analyse des risques ?	125
IV.7. Conclusion	126

IV.1. Introduction

La sûreté de fonctionnement est une démarche visant à déterminer et à évaluer les risques qui peuvent affecter la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité d'un système tout au long de leur cycle de vie. Elle est couramment utilisée dans de nombreux secteurs à haut risque. L'objectif de l'analyse par sûreté de fonctionnement est de garantir que le système est à la fois sécurisé, fiable et fonctionnel, en détectant les failles éventuelles et en mettant en place des solutions pour y remédier. Cette démarche peut être effectuée à des stades différents de la vie du système, à partir de la conception jusqu'à la remise en service et son exploitation.

La sûreté de fonctionnement est un domaine basé sur le suivi méthodologique des systèmes technologiques pendant tout leur cycle de vie [69] :

- ❖ Expression du besoin, Conception, fabrication, production, utilisation
- ❖ Diffusion, suivi (maintenance) et même arrêt du service.

Ces démarches s'appuient sur des méthodologies robustes ainsi que sur des outils concrets et puissants. Les méthodes de Sdf présentent toutes au moins quatre éléments communs, que l'on peut définir en quatre points essentiels :

- ❖ Étude des défaillances : identification des éléments susceptibles d'affecter la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité ou la sécurité. Toutes les méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement se focalisent sur la détermination et l'analyse des défaillances éventuelles d'un système. Les défaillances matérielles, logicielles, humaines sont autant d'exemples.
- ❖ Les modèles sont utilisés dans les méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement pour décrire le système étudié et les processus qui y sont liés. Ces modèles prennent différentes formes : arbres de défaillance, graphes, réseaux de Petri, etc.
- ❖ Quantification des risques : toutes les méthodes tentent de quantifier les risques liés aux défauts identifiés. Cela nécessite souvent l'utilisation de méthodes de calcul des probabilités pour prévoir la probabilité des défaillances et les conséquences qui peuvent en résulter pour le système.
- ❖ Le but de ces méthodes est de proposer des solutions pour minimiser ou supprimer les risques identifiés. Il peut s'agir de revoir la conception du système, d'intégrer des dispositifs de sécurité et de renforcer la maintenance.

Le fait de prendre en compte les défaillances d'un système, d'utiliser des modèles, de quantifier les risques et de trouver des solutions pour mieux assurer la sécurité et augmenter la fiabilité du système étudié sont autant d'éléments communs aux méthodes d'analyse de sûreté. En revanche, ces méthodes présentent chacune des avantages et des inconvénients, et leurs choix varie en fonction du contenu et des objectifs de l'analyse. Pour réaliser une telle analyse de sûreté de fonctionnement, il convient de maîtriser plusieurs éléments :

- ❖ Une compréhension technique approfondie du système.
- ❖ Le retour d'expérience sur le mode de fonctionnement et les défaillances susceptibles de survenir dans le système ou dans un système similaire.
- ❖ Avoir une bonne maîtrise des méthodes d'analyse de la sûreté qui nécessitent de la finesse et du jugement de la part de l'analyste.

Il est possible de classer l'analyse de sûreté de fonctionnement de système en plusieurs étapes importantes, qui sont décrites ci-après

- ❖ L'analyse fonctionnelle et structurelle consiste à déterminer les composants, les fonctions et les interdépendances du système. Pour ce faire, on peut utiliser des méthodes comme les diagrammes de blocs. L'objectif est de pouvoir acquérir une connaissance approfondie de la structure et du comportement du système.
- ❖ L'analyse qualitative consiste à trouver et à analyser les dangers éventuels et les types de défaillance liés à la fonctionnalité du système. L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), l'analyse par arbre de défaillance (ADD) peuvent être utilisées à cette fin. Le but est de déterminer et de hiérarchiser au mieux les modes de défaillance et les composants critiques.
- ❖ Cette étape consiste à quantifier les risques liés aux composants et aux modes de défaillance critiques pour la sécurité qui ont été détectés durant l'analyse qualitative. Le but est de déterminer la probabilité et les conséquences d'événements critiques pour la sécurité, ainsi que d'identifier toute mesure de sécurité supplémentaire qui pourrait s'avérer nécessaire
- ❖ Synthèse et conclusion : au cours de cette étape, les résultats des analyses précédentes sont synthétisés et des conclusions sur la sécurité du système sont tirées. Il est possible de déterminer les lacunes de l'analyse de la sécurité ou de suggérer des mesures de sécurité supplémentaires. Le but est de donner une

Chapitre IV : Analyse des risques : démarches et méthodes de base du Sûreté de fonctionnement

connaissance approfondie de la sécurité du système et de garantir que des mesures de sécurité adéquates sont en mesure de gérer les risques liés au fonctionnement du système.

D'une manière générale, cette méthodologie structurée vise à garantir que la sécurité est prise en compte tout au long du cycle de vie du système, de la conception à l'exploitation et à la maintenance. Elle permet une démarche méthodique pour identifier et gérer les risques liés à la sécurité, ainsi que pour s'assurer que des mesures de sécurité adéquates sont en vigueur afin de protéger les personnes, les biens et le milieu environnant.

Le schéma de la figure IV.1 illustre le déroulement de ces différentes étapes. Il convient de préciser que ces étapes ne sont pas complètement disjointes et qu'elles partagent certains aspects. En outre, dans une recherche réelle, les étapes primaires sont répétées plusieurs fois jusqu'à ce qu'une conclusion acceptable soit atteinte (objectifs atteints)

Les principales démarches et méthodes largement utilisées dans l'analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes sont abordées dans ce chapitre. Il traite en profondeur des étapes et des méthodes utilisées pour analyser les risques liés à un système donné. Ce chapitre a pour but de présenter une vue d'ensemble des méthodes les plus fréquemment employées afin d'assurer la sûreté de fonctionnement des systèmes, ainsi que les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles.

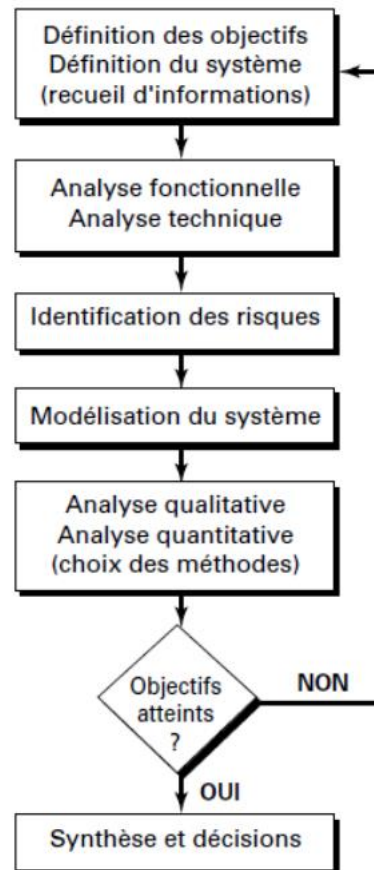


Figure IV.1. Représentation schématisée des tâches d'une analyse prévisionnelle

IV.2. Analyse fonctionnelle du système

L'analyse fonctionnelle représente une phase essentielle car, avant d'entamer une recherche sur le pourquoi un système tombe en panne, il est nécessaire de comprendre son fonctionnement, cette analyse permet la description synthétique des modes de fonctionnement d'un système et la prise de connaissance des fonctions à assurer ; elle permet d'établir de manière systématique et exhaustive les liens fonctionnels à l'intérieur et à l'extérieur du système. Autrement dit, l'analyse fonctionnelle vise à rechercher et à décrire les fonctions que propose un système afin de répondre aux besoins de son utilisateur [88,99,100,101].

ou bien une technique permettant de mieux comprendre le comportement et la structure d'un système en déterminant ses fonctions primaires et leurs interrelations. Cette analyse consiste à décomposer un système complexe du point de vue de sa structure en sous-systèmes plus simples, tout en identifiant les données d'entrée, les données de sortie et les rôles de chacun des composants.

Les concepts de base présentés dans les méthodes d'analyse fonctionnelle sont les suivants [69,72,88,102] :

- ❖ L'exigence de l'utilisateur à l'égard d'un système en termes de tâches qui doivent être garanties.
- ❖ Il faut décrire les contraintes technologiques qui sont imposées au concepteur. L'environnement, la technologie, le marché, la situation, les préférences de l'entreprise ou du groupe sont autant de sources de contraintes.
- ❖ Une description du système en termes de fonctions de service ou d'usage (satisfaction d'un besoin) et de fonctions de contrainte (solutions techniques prises qui s'adaptent aux contraintes). Les fonctions de service ou d'utilisation sont celles qui répondent immédiatement aux demandes de l'utilisateur ou du client. Ces fonctions sont décrites en fonction des résultats escomptés ou des exigences à satisfaire. Le terme "fonctions de contrainte" est utilisé pour décrire les solutions techniques employées pour satisfaire aux contraintes associées à la conception, à la fabrication ou à l'utilisation d'un système. Ces fonctions sont déterminées par les caractéristiques techniques du système.
- ❖ Optimisation du produit du point de vue du coût et de la fiabilité implique la prise en compte de ces deux facteurs depuis la conception du produit. Ceci permettra d'obtenir le meilleur compromis possible pour le coût et la fiabilité, tout en tenant compte des exigences de l'utilisateur et les contraintes de fabrication et de conception.

IV.3. Généralité sur les Méthodes d'évaluation des Risques

On peut classer les méthodes d'analyse prédictive [69,103,104,105,106,107] en trois étapes fréquemment utilisées, qui se démarquent selon leur mode de raisonnement :

IV.3.1. Analyse qualitative / quantitative

IV.3.1.1. Méthodes qualitatives

Les résultats offrent notamment des détails sur les propriétés du système, à savoir ses points vulnérables, les faux redondants, l'impact d'un élément donné sur la fiabilité du système, l'identification des chemins critiques, le test (pour les chemins critiques) des méthodes visant à l'éliminer, etc.

IV.3.1.2. Méthodes quantitatives

Les résultats impliquent des mesures de fiabilité, de disponibilité, ... par exemple, la probabilité qu'un ensemble d'événements se produise.

IV.3.2. Analyse inductive / déductive

IV.3.2.1. Méthodes inductives

Ces méthodes examinent un événement déclencheur (défaillance technique, dysfonctionnement organisationnel, etc.) et tentent de caractériser les conséquences sur le système et son environnement en utilisant une démarche descendante. Par conséquent, ces méthodes démarrent par des causes et mènent aux conséquences.

IV.3.2.2. Méthodes déductives

Un événement redouté (arrêt d'un système, anomalie de fonctionnement, ...) dont on cherche à expliquer les causes, typiquement sous forme de séquences d'événements, en utilisant une approche ascendante. Généralement en forme de séquences d'événements.

Pour décrire les liens entre les causes et les conséquences, les méthodes sont dites inductives ou déductives, selon qu'elles partent des causes pour déduire les conséquences ou des conséquences pour remonter aux causes. Bien que l'une soit exclusive de l'autre, toute stratégie inductive est bien complétée par une approche déductive, et les deux se complètent l'une l'autre [7].

Ces méthodes sont présentées dans la figure IV.2 en fonction du mode d'analyse du système ainsi qu'au mode de déroulement d'événements au fil du temps.

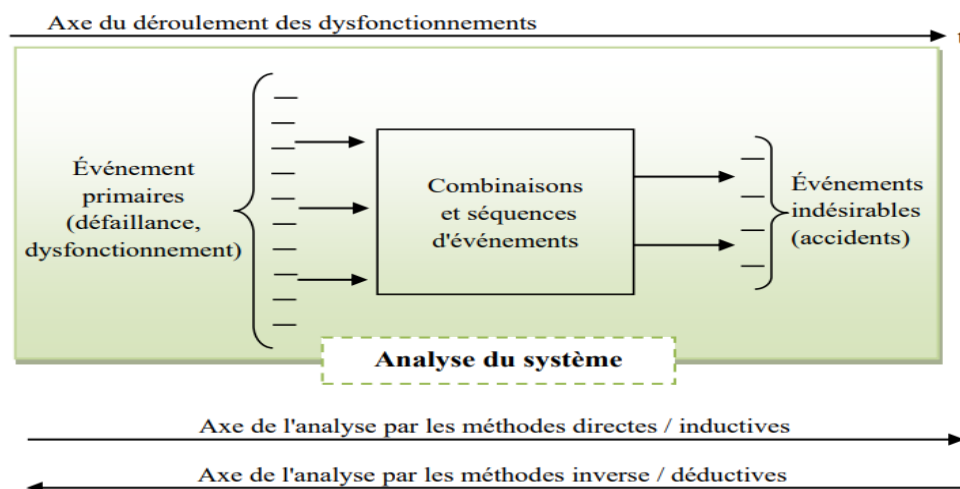


Figure IV.2. Rapprochement entre l'axe du déroulement des événements et les modes d'analyse du système [104]

IV.3.3. Analyse statiques/dynamiques

IV.3.3.1. Méthodes statiques

Elles permettent une analyse structurelle du système sans tenir compte des aspects temporels et sont fondées sur un modèle mathématique booléen du système qui présente, par exemple, les différentes combinaisons de défaillances entraînant un dysfonctionnement du système, mais qui ne représentent pas les liens temporels qui l'influencent.

IV.3.3.2. Méthodes dynamiques

Ce type de méthode tient donc compte des facteurs comportementaux et temporels. Les données d'entrée de ces méthodes sont de deux sortes :

- ✓ La connaissance du système, qui provient généralement d'une analyse fonctionnelle.
- ✓ Données résultant d'un événement, qui peuvent se présenter sous la forme de données brutes (états, historiques, etc.) ou bien d'un modèle statistique (lois mathématiques décrivant des fonctions de distribution d'événements).

Les résultats obtenus en sortie sont les suivants :

- ❖ Des modèles de comportement du système (vis-à-vis des défaillances, réparations, sollicitations, service, ...) :
- ✓ Modèles de sûreté de fonctionnement,
- ✓ Modèles mixtes sûreté de fonctionnement/performance, ...,
- ❖ Grandeurs fondées sur des modèles capables de prendre différentes formes :
 - ✓ Probabilités d'états ou d'occurrence d'événements,
 - ✓ Quantificateurs FMDS, etc.
 - ✓ Métriques évoluées de performance et de coût.
- ❖ Éléments de stratégie visant à aider à l'action ou à la prise de décision :
 - ✓ Maintenance : inspection, régularité des réparations, etc.
 - ✓ La gestion des risques comprend la protection, l'évitement, ...

Les méthodes sont présentées dans le tableau IV.1 selon les trois critères susmentionnés et les objectifs souhaités. Ainsi, une méthode peut être sélectionnée en raison des objectifs de la recherche ou de la nature des résultats, qui peuvent être quantitatifs, qualitatifs ou une sorte de combinaison entre les deux.

Tableau IV.1 Principales Méthodes de base de Sdf

Méthodes	Inductive/ déductive	Qualitative/ quantitative	Statique/ dynamique	Objectifs visés
Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leurs Criticité (AMDEC)	Inductive	Qualitative	Statique	Identifier les effets des modes de défaillance des composants sur le fonctionnement du système.
HAZard Operability (HAZOP)	Inductive	Qualitative	Statique	Identifier les dérives potentielles (ou déviations) des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation ou du système
Arbre de Défaillance (AdD)	Déductive	Qualitative Quantitative	Statique	De manière schématique, représenter toutes les formes de combinaisons d'événements qui peuvent produire un événement redouté.
Arbre d'Événement (AdE)	Inductive	Qualitative Quantitative	Statique	Représenter par le biais de scénarios les conséquences éventuelles d'un événement déclencheur, d'une défaillance
Réseau de Pétri	Inductive	Qualitative Quantitative	Dynamique	Identifier le cheminement des états de défaillance sur le fonctionnement du système
Chaînes de Markov	Inductive	Qualitative Quantitative	Dynamique	Identifier le cheminement des états de défaillance sur le fonctionnement du système.
Réseaux Bayésien dynamique	Inductive	Qualitative Quantitative	Dynamique	Identification de l'évolution du système dans les états : bon fonctionnement, dégradé, panne

IV.4. Analyse dysfonctionnelle : méthodes d'identification et d'évaluation des risques

Les méthodes d'identification et d'évaluation des défaillances possibles des systèmes comprennent l'analyse et l'évaluation dysfonctionnelle. Il s'agit d'étudier des scénarios susceptibles d'empêcher le système de fonctionner correctement ou de satisfaire les besoins des utilisateurs.

Les méthodes utilisées pour l'analyse des dysfonctionnements sont présentées sous différentes formes : tabulaires, arborescences, réseaux, graphes, etc.

IV.4.1. AMDE / AMDEC

IV.4.1.1. AMDE (Analyse des modes de défaillances, de leurs effets)

Cette méthode est connue en anglais sous le nom de FMEA [failure mode and effect analysis], a fait son apparition à la fin des années 1950 et au début des années 1960 dans le domaine de l'aéronautique américaine [72,79,108,109]. Elle est inductive et permet d'étudier de manière systématique les causes et les effets des défaillances (modes de défaillance et effets) qui ont un impact sur les composants du système. L'AMDE permet de vérifier si les composants, avec leurs modes de défaillance connus, répondent aux exigences de sécurité au niveau du système. Selon les résultats de cette méthode, les composants identifiés peuvent être acceptés ou, éventuellement, être recommandés pour des contrôles de maintenance, ou voire même nécessiter le remplacement de certains composants [70]. La méthode se déroule en quatre étapes et se démarque par une représentation structurée de tableaux, qui sont généralement spécifiques à un secteur industriel [73].

- **Identification du système, de ses fonctions et de ses composants** : identification des principales fonctions du système, de ses limites fonctionnelles (systèmes et composants) et des caractéristiques liées au mode de fonctionnement du système, de ses composants ainsi que de son environnement.
- **Identification les modes de défaillance des composants et leurs causes** : Il est essentiel de décrire le comportement du système en cas d'apparition d'un mode de défaillance étudié. En général, les modes de défaillance se répartissent en cinq types. (Normalisées) :
 - ✓ Fonctionne à un instant non désiré
 - ✓ Ne fonctionne pas au moment prévu
 - ✓ Ne s'arrête pas au moment prévu
 - ✓ Ne fonctionne pas.
 - ✓ Fonctionne, mais les performances requises ne sont pas obtenues
- **Identification des effets des modes de défaillance** : Il est important de déterminer l'impact du mode de défaillance de chaque composant sur le système.
- **Conclusions et recommandations** : Sur la base des étapes qui précèdent, nous pouvons tirer des conclusions et donner des recommandations tout en gardant à l'esprit les objectifs de l'étude. Les recommandations permettent de faire des préconisations comme

par exemple l'ajout de processus de redondance, de détection et de maintenance selon le mode de défaillance. Le schéma IV.3 illustre le déroulement de l'analyse AMDE.

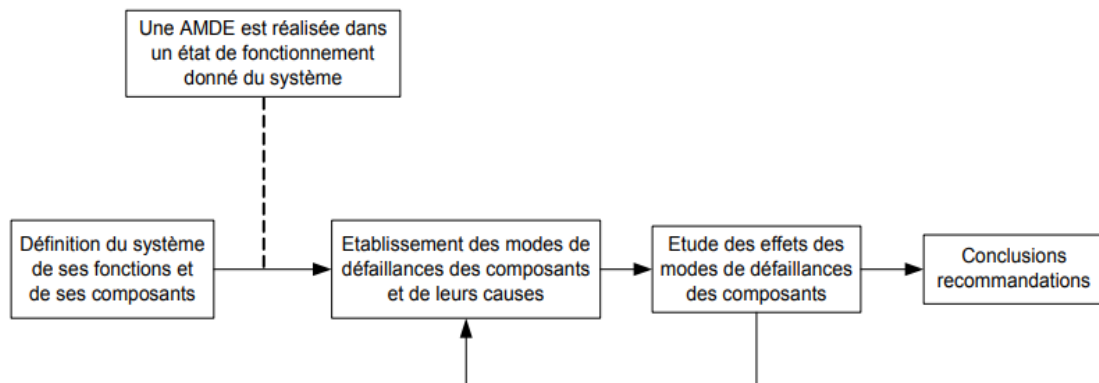


Figure IV.3. Etapes de l'élaboration de l'AMDE [104]

Les modes de défaillance ont pour origine un fonctionnement spécifique du système. Afin de faciliter la tâche à l'analyste, des tableaux sont présentés à l'annexe C, qui fournissent une liste indicative des modes de défaillance génériques. Un tableau d'AMDEC est également présenté.

IV.4.1.2. AMDEC (L'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité)

Cette méthode est connue en anglais sous le nom de FMECA [failure mode and effect and criticality analysis] [69,70,72,73 ,92] est une extension de l'AMDE par l'introduction d'une analyse de la criticité visant à vérifier si les modes de défaillance ayant des effets graves possèdent une probabilité d'occurrence suffisamment faible. Les deux techniques donnent naissance à des résultats sous forme de tableaux. Elle est inductive qui, tient compte de la probabilité d'occurrence de chaque mode de défaillance et de la gravité des effets engendrés afin de réaliser une classification suivant une échelle de criticité et de recenser les éléments ayant un impact sur les critères FMDS (fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité) du système.

L'AMDE repose notamment sur les définitions suivantes, indiquées pour chaque mode de défaillance :

- ❖ Une défaillance est la perte de la capacité d'un composant ou d'un système à accomplir une fonction donnée.
- ❖ Un mode de défaillance est l'impact que produit une défaillance sur un élément du système.

Chapitre IV : Analyse des risques : démarches et méthodes de base du Sûreté de fonctionnement

- ❖ Une cause de défaillance correspond aux événements qui mènent aux défaillances,
- ❖ L'effet d'un mode de défaillance correspond aux conséquences associées à la perte de la capacité d'un composant à effectuer une fonction donnée.
- ❖ Les mesures de détection correspondent aux activités qui permettent de détecter les défaillances (essais périodiques, inspections, systèmes d'alarmes, etc).

Afin d'évaluer la criticité d'une défaillance, l'AMDEC est une véritable suite cohérente de l'AMDE. Pour chaque mode de défaillance, la criticité est prise en compte [110] :

- ❖ La probabilité d'occurrence
- ❖ Gravité : permet d'associer à chaque mode de défaillance un niveau d'effets (mineur ou faible, important, critique ou catastrophique, etc.),
- ❖ Le danger potentiel de la non-détection est accru par l'absence de barrières physiques ou logicielles pour éviter les défaillances.

La criticité d'une défaillance représente le produit de sa probabilité d'occurrence, de sa gravité et du risque de non-détection. L'AMDEC intègre les principales étapes de l'AMDE ainsi qu'une évaluation quantitative de la criticité.

La démarche générale de l'AMDEC est décrite dans la norme NF EN 60812 intitulée "Techniques d'analyse de la fiabilité du système - Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)", à laquelle la figure IV.4 présente un organigramme qui la résume [111]. Des informations plus détaillées sur l'analyse AMDEC sont données en Annexe C.1.

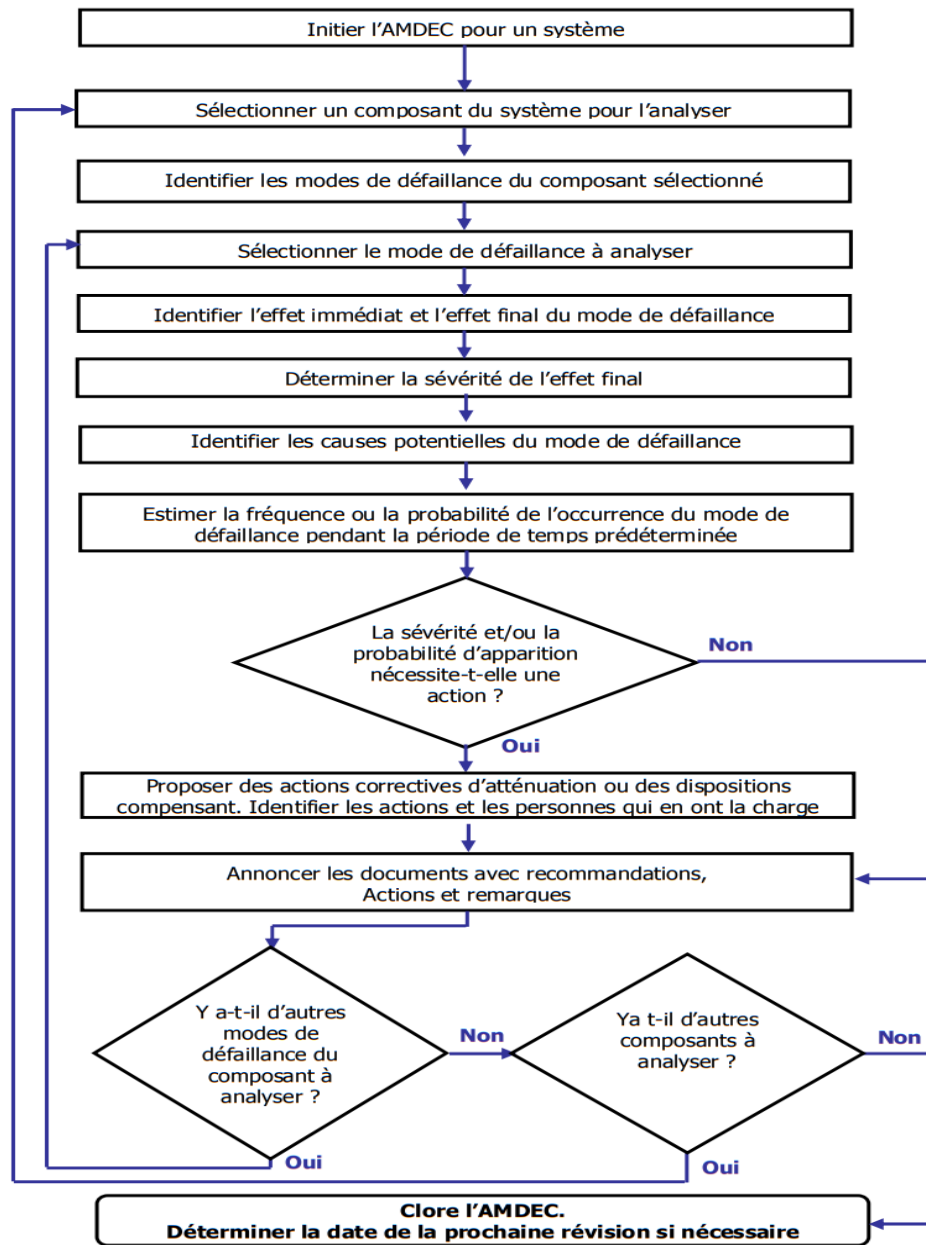


Figure IV.4. Organigramme de la méthode AMDEC (NF EN 60812)

IV.4.2. HAZOP

Au début des années 1970, Imperial Chemical Industries (ICI) a créé la méthode HAZOP, qui signifie HAZard OPerability. Elle a été ensuite utilisée dans divers secteurs industriels. Imperial Chemical Industries, qui fait partie des plus grandes entreprises chimiques du monde, a choisi de renforcer la performance de ses procédés et la sécurité de ses installations. La technique HAZOP a été créée à cette fin. Elle a pour but d'identifier tous les dangers et risques pouvant mettre en péril un lieu industriel afin de prévenir tout événement qui pourrait être dommageable.

Chapitre IV : Analyse des risques : démarches et méthodes de base du Sûreté de fonctionnement

HAZOP est consacré à l'analyse des risques des systèmes thermo-hydrauliques dans lesquels les paramètres de contrôle tels que la pression, la température, le débit... sont essentiels. Cette méthode est très proche de la méthode AMDE. HAZOP ne porte plus sur les modes de défaillance, mais sur les déviations potentielles des paramètres primaires de l'installation. Elle est donc focalisée sur l'installation, contrairement à l'AMDE qui est centrée sur les composants.

L'HAZOP est une méthode qualitative [70] basée sur des mots-guides et elle est souvent mise en œuvre par une équipe pluridisciplinaire au cours des premières étapes du cycle de vie du système (c'est-à-dire l'analyse des besoins, la conception de haut niveau) afin d'anticiper les dangers. Un mot-guide (par exemple, aucun, plus de, moins de, partie de, plus que, autre) décrit un écart hypothétique par rapport aux paramètres attendus d'un procédé. Les causes de défaillance et leurs effets sont répertoriés à l'aide de ces mots-clés. Chaque effet est ensuite examiné et des actions sont proposées pour l'atténuer ou pour diminuer la probabilité de la cause de défaillance. Les informations recueillies au cours du processus HAZOP sont représentées sous forme de tableau.

La figure IV.5 présente un organigramme illustrant les étapes de l'étude des déviations par HAZOP [112]. Des informations plus détaillées sur l'analyse HAZOP figurent à l'annexe C.3.

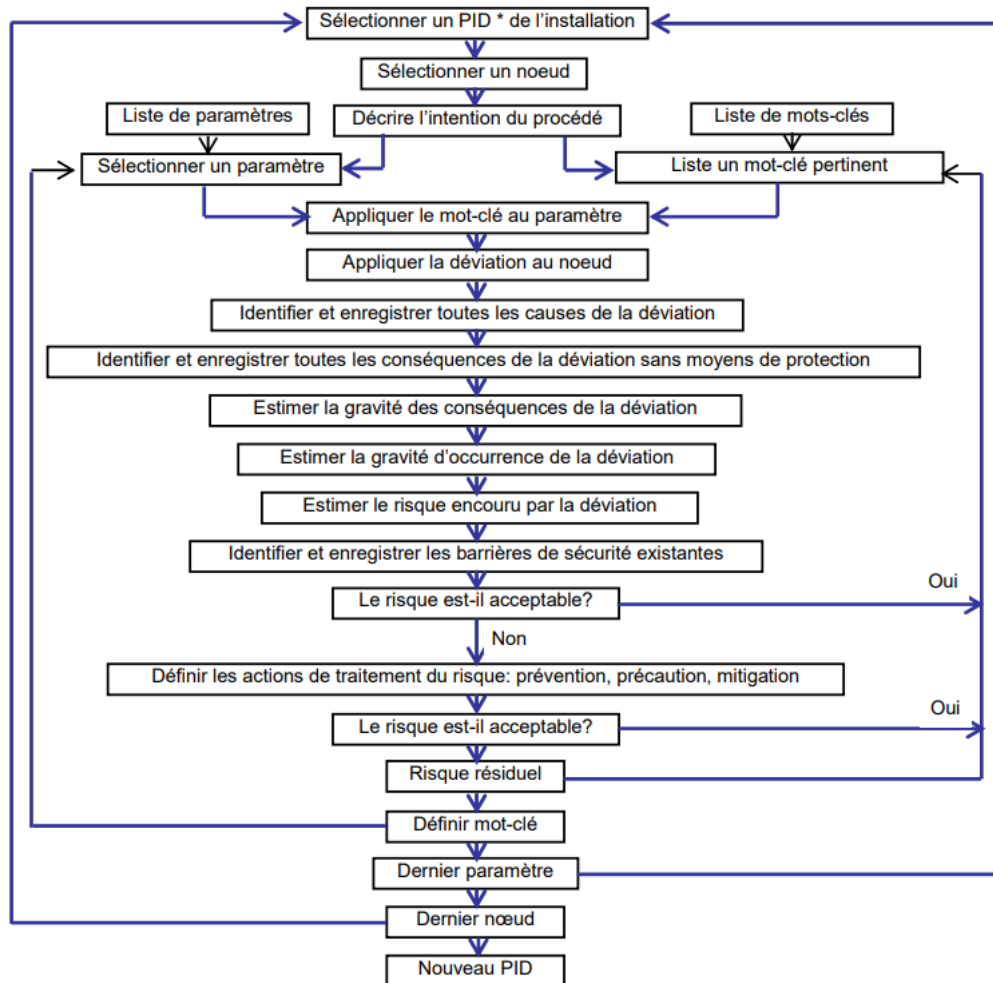


Figure IV.5. Organigramme de la méthode HAZOP

IV.4.3. Arbre de défaillance

Arbre des défaillance (ADD) est connue en anglais sous le nom de FTA [Fault Tree Analysis], est une technique permettant d'analyser la sécurité et la fiabilité des systèmes [69,72,111,113,114,115]. Elle a été élaborée au début des années 1960 par la société américaine « Bell Telephone » et expérimentée pour la sécurité des systèmes de tir de missiles, est une méthode de type déductif appelée aussi l'arbre de dysfonctionnements, l'arbre des défauts, ou l'arbre des causes. Cette méthode permet d'identifier tout enchaînement ou combinaison d'événements susceptibles de conduire à une situation dangereuse définie au préalable. Elle permet de remonter de cause en cause jusqu'aux événements fondamentaux les plus susceptibles d'être la source de l'événement redouté. Elle implique une représentation graphique des différentes causes d'un événement redouté. Cette méthode permet de mettre en évidence les relations entre les défaillances de l'équipement, les défauts humains et les facteurs

Chapitre IV : Analyse des risques : démarches et méthodes de base du Sûreté de fonctionnement

environnementaux susceptibles d'entraîner des accidents. Par conséquent, les facteurs liés aux aspects organisationnels peuvent être inclus.

L'analyse de l'arbre des défaillances est généralement réalisée selon trois étapes :

- ✓ Définition du système et ses limites
- ✓ Spécification des événements redoutés précédemment définis, à titre d'exemple, par l'AMDEC
- ✓ Création des arbres de défaillance : Les événements redoutés sont pris en compte un par un et on tente d'identifier les enchaînements et les combinaisons d'événements de base qui les ont provoqués.

Un événement de base, en revanche, requiert un certain nombre de points, dont les suivants : il doit être indépendant des autres événements de base, Il ne peut être décomposé en composants plus simples et il doit posséder une périodicité observable.

En utilisant le symbolisme de la logique booléenne, à partir de l'événement centrale nous construisons une structure arborescente (Une structure hiérarchisée sous la forme d'arbre inversé) décrivant la séquence logique des événements intermédiaires jusqu'à l'implication des événements de base (défaillance d'un composant). En conséquence, il est possible d'identifier tous les défauts fondamentaux qui pourraient contribuer à l'événement redouté « centrale ». Les opérateurs logiques (and, or, k-sur-n...) sont employés pour créer des liens entre les différents évènements.

Cette méthode repose sur une structure graphique qui représente les résultats obtenus sous la forme d'une arborescence, comme le montre la figure IV.6.

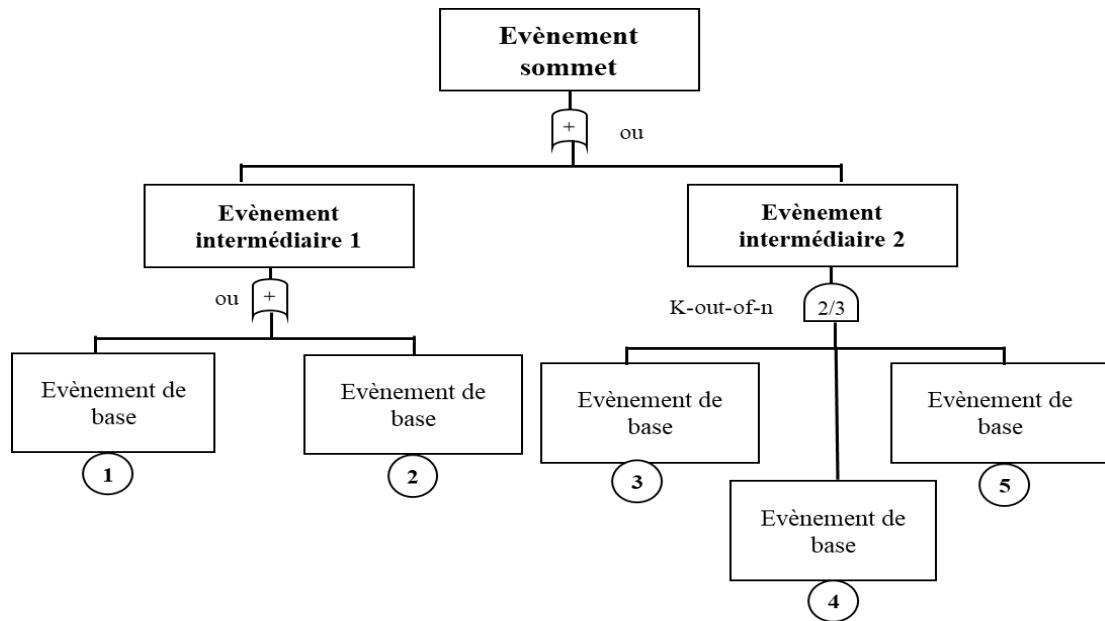


Figure IV.6. Exemple de Structure d'un arbre de défaillance

La méthode d'Arbre des défaillances permet d'analyser un système suivant deux axes différents [69,72 ,113] :

IV.4.3.1. Analyse qualitative

Cette étude permet d'identifier les failles du système. Elle est réalisée afin de fournir des propositions de modifications pour augmenter la fiabilité du système. Cette étape correspond à la construction de l'arbre et à la recherche des coupes minimales (l'ensemble des événements ou des conditions de base susceptibles de provoquer la défaillance). L'annexe C.2 présente plus de détails sur l'analyse par l'AdD.

IV.4.3.2. Analyse quantitative

Cette analyse a pour but d'évaluer les probabilités d'occurrence au niveau de l'évènement élémentaire, des coupes minimales et au niveau de l'évènement centrale (la défaillance). Connaissant la probabilité des événements de base, il est possible d'estimer la probabilité d'occurrence de l'ER. Les calculs sont basés sur les équations logiques issues de la structure de l'arbre de défaillance ainsi que sur les probabilités d'occurrence des événements élémentaires.

Soit un système de distribution des entrées E_1, E_2, \dots, E_n , Les équations de logique booléenne utilisées pour déterminer les probabilités de défaillance sont les suivantes :

La porte logique "ET" est définie comme étant le produit des événements d'entrée qui sont présentés simultanément afin que l'événement central se produise. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$P(T) = P(E_1 \cap \dots \cap E_n) = \prod_{j=1}^n E_j = P(E_1) \dots \times P(E_n) \quad (IV-1)$$

La porte logique "Ou" est la somme des probabilités de l'événement d'entrée. Si l'un de ces événements est présent, l'événement principal se produit selon l'expression suivante :

$$P(T) = P(E_1 \cup \dots \cup E_n) = \sum_{j=1}^n E_j = \sum_{j=1}^n (1 - (1 - E_1) \times \dots \times 1 - (1 - E_n)) \quad (IV-2)$$

La porte logique K-sur-N (K/N), appelée porte de combinaison, est la probabilité des événements d'entrée. Lorsque N=3, par exemple, il suffit que K=2 des événements d'entrée soient présents simultanément (2/3) pour que l'événement principal se produise. Elle s'exprime par la formule suivante

$$P(T) = P((E_1 \cap \dots \cap E_K) \cup \dots \cup (E_1 \cap \dots \cap E_{K-1} \cap E_{K+1}) \cup \dots \cup (E_{n-k} \cap \dots \cap E_n)) \quad (IV-3)$$

Avec : $P(T)$ est la probabilité de l'événement central et E_j est l'événement d'entrée et K de la condition K-sur-N représente le minimum de l'événement d'entrée.

IV.4.3.3. Facteurs d'importance probabilistes (FIP)

Les facteurs d'importance probabilistes [69,92,113,116,117,118] sont des identificateurs utilisés dans l'analyse probabiliste de la sécurité des systèmes. Ils servent à évaluer l'importance relative de chaque composant dans l'occurrence d'un accident ou d'une défaillance. Ces indicateurs offrent ainsi la possibilité de hiérarchiser les composants en fonction de leur importance au regard de la sûreté de fonctionnement du système considéré.

✓ **Facteur d'importance Marginale de Birnbaum (FIM)**

Le facteur d'importance marginal ou bien facteur d'importance probabiliste, a été introduit par Birnbaum [119] en 1968 comme mesure de la fiabilité (ou de la disponibilité du système) en fonction de la fiabilité des composants. Pour un système 'T' de n composants, le FIB pour un composant 'Y_i' à l'instant 't', est exprimée de la manière suivante :

$$I_{Y_i}^{Pr}(t) = \frac{\partial P_T(t)}{\partial P_{Y_i}(t)} \quad \text{avec } i = 1, 2, \dots, n \quad (IV-4)$$

Le facteur d'importance probabiliste de Birnbaum peut être défini comme la probabilité que le système T, dans son état de fonctionnement, ait un composant Y_i comme élément critique, sachant que Y_i est en service, soit :

$$I_{Y_i}^{Pr}(t) = P(T | Y_i)(t) - P(T | \bar{Y}_i)(t) \quad (IV-5)$$

Où : $P(T | Y_i)(t)$ Présente la probabilité conditionnelle lorsque le système T est défaillant sachant que le composant Y_i est défaillant, et $P(T | \bar{Y}_i)(t)$ désigne la probabilité conditionnelle lorsque le système T est défaillant sachant que le composant Y_i est en service.

Une valeur FIM très faible a un effet négligeable sur la fiabilité du système. Le FIM est également utilisé afin de déterminer d'autres facteurs, parmi lesquels le facteur de criticité

- ✓ **Facteur d'importance Critique** est un facteur lié à la FIM, qui est utilisé pour évaluer l'impact des changements dans la fiabilité d'un composant de base sur le risque total associé au système. Cela signifie d'identifier les composants critiques qui nécessitent une intervention particulière en termes de maintenance, de contrôle et suivi afin de renforcer la fiabilité de ces composants, pour rétablir le fonctionnement du système. Le facteur d'importance critique $I_{Y_i}^{Cr}$ pour un composant ' Y_i ' à l'instant 't' est la probabilité que le composant ' Y_i ' tombe en panne et qu'il soit à l'origine de la défaillance du système. Sachant que le système est défaillant à l'instant 't'.

$$I_{Y_i}^{Cr}(t) = \frac{P_{Y_i}(t)}{P_T(t)} \times I_{Y_i}^{Pr}(t) \quad \text{avec } i = 1, 2, \dots, n \quad (IV-6)$$

Facteur d'importance Critique permet d'améliorer les performances du système en privilégiant les éléments réellement essentiels, plutôt que d'accorder une grande importance à des éléments qui ont très peu de chances de se produire.

- ✓ **Facteur d'importance Diagnostique de Fussel-Vesely (FID)** correspond à la probabilité de défaillance du composant ' Y_i ' lorsque le système est en panne. Ce facteur est connu pour son utilité dans le but de diagnostiquer les causes de la panne d'un système.

$$F_{Y_i}(t) = P(Y_i | T)(t) = \frac{P_{Y_i}(t)}{P_T(t)} \times P(T | Y_i)(t) \quad (IV-7)$$

Il est particulièrement utile pendant la phase de conception du système, lorsque des changements fonctionnels et/ou de conception sont susceptibles d'intervenir, ce qui fait varier considérablement le risque lié à un système.

La méthode de l'arbre de défaillance est une forme statique pour représenter le système étudié, fondée sur la logique booléenne. Elle est conçue pour les systèmes ayant un aspect statique, autrement dit pour les systèmes présentant des liens fonctionnels fixés entre leurs composants.

Les modèles de transition d'état tels que les graphes d'état (graphes de Markov et réseaux bayésiens) et les techniques basées sur les réseaux de Petri sont les mieux adaptés à la modélisation et à l'analyse des systèmes dynamiques [72].

IV.4.4. Arbre d'évènement

L'analyse par arbre d'évènement [100,101,103,120,121] est dite Event tree Analysis en anglais. L'arbre de décision est le nom donné à l'arbre d'évènement lorsqu'elle a été utilisée pour la première fois dans la prise de décision commerciale. L'utilisation de l'arbre d'évènement dans l'analyse de la sécurité des processus a vu le jour en 1975 lorsque la Commission de réglementation nucléaire des États-Unis a créé une étude sur la sécurité des réacteurs. Comme étant une technique inductive, L'analyse par arbre d'évènement permet d'identifier et d'évaluer la séquence d'évènements dans un scénario d'accident potentiel après l'apparition d'un évènement déclencheur. Cette analyse a pour but de déterminer si l'évènement déclencheur est susceptible d'entraîner un accident grave ou si l'évènement peut être contrôlé de manière adéquate par les systèmes et les procédures de sécurité prévue dans la conception du système. Pour un même évènement déclencheur, elle peut produire de nombreux résultats possibles distincts et permet de calculer la probabilité de chacun d'entre eux.

L'analyse par arbre d'évènement repose sur les définitions suivantes :

- ✓ **Scénario d'accident** : Série d'évènements conduisant à un accident. La séquence d'évènements commence par un évènement déclencheur qui est généralement suivi d'un ou de plusieurs évènements critiques qui conduisent à l'état final indésirable.
- ✓ **Évènement initiateur (EI)** : Défaillance ou évènement indésirable qui marque le début d'une séquence d'accident.
- ✓ **Évènements pivots** : Évènements qui se produisent entre l'EI et l'accident final. Il s'agit des évènements d'échec ou de réussite des méthodes de sécurité de conception qui ont été mises en place pour éviter que l'EI ne provoque une défaillance. Si un évènement pivot se produit effectivement, le scénario d'accident prend fin et l'évènement est considéré comme un évènement atténuant. Si un évènement pivot ne se produit pas, la

situation d'accident se poursuit et cet événement est considéré comme un événement aggravant.

- ✓ **Évaluation probabiliste des risques** : Méthode d'analyse complète, structurée et logique permettant d'identifier et d'évaluer les risques liés à un système.
- ✓ **Arbre d'événements** : Modèle graphique d'un scénario d'accident qui génère des résultats ainsi que des probabilités de ces résultats.

Il serait plus approprié de créer un arbre des événements après une analyse initiale des accidents possibles, comme dans le cas de l'APR (Analyse Préliminaire des Risques). Les fonctions de sécurité doivent être assurées par des barrières dont le but de prévenir tout processus visant à réaliser un accident causé par un événement initiateur.

À partir de l'événement initiateur, l'arbre est construit en tenant compte du fonctionnement correct ou du dysfonctionnement de la première fonction de sécurité.

Il faut ensuite étudier le développement de chaque branche en considérant méthodiquement le fonctionnement ou la défaillance de la fonction de sécurité jusqu'à la survenue d'un accident potentiel. La figure IV.7 ci-dessous présente un exemple d'arbre d'événements.

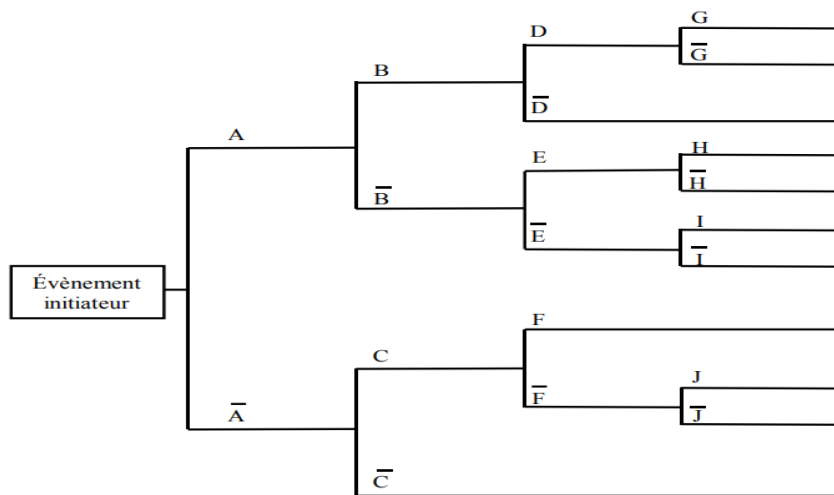


Figure IV.7. Exemple de la structure d'arbre d'événement

IV.4.5. Nœud papillon

Le nœud papillon [135,136] fait partie des meilleures méthodes graphiques pour illustrer un scénario d'accident dans son ensemble, en commençant par les causes et en terminant par les conséquences. Il se compose d'un arbre de défaillance dans la partie gauche, qui identifie

les événements susceptibles d'être à l'origine de l'événement critique, et d'un arbre d'événements dans la partie droite, qui montre les diverses conséquences associées à l'événement critique suite à l'échec ou à la performance des fonctions de sécurité.

IV.4.6. Simulation de Monte Carlo

De nombreuses questions scientifiques nécessitent le calcul de sommes et d'intégrales, ainsi que la résolution d'équations ou encore de problèmes d'optimisation. Les techniques de calcul direct, également appelées techniques analytiques, sont toutefois rapidement prises de court par la complexité des modèles : elles font intervenir des hypothèses trop fortes, ce qui les rend inapplicables, ou bien la variété des opérations requises, comme dans le cas du calcul de sommes, est parfois trop importante pour être effectuée dans un laps de temps raisonnable. En conséquence, des méthodes d'approximation sont utilisées [123]. La simulation de Monte Carlo peut être considérée comme une méthode d'approximation, nommé Monte Carlo pour faire référence aux jeux de hasard. Elle est surtout utile pour répondre à des problèmes complexes dont les variables d'entrée sont incertaines ou variables. La distribution de probabilité d'une variable de sortie est simulée en effectuant un grand nombre de calculs aléatoires avec différentes valeurs de variables d'entrée

La méthode de simulation par Monte Carlo [69,122,124] repose sur l'idée de simuler le " cycle de vie " du système tout au long de sa période d'exploitation. Un certain nombre d'échantillons sont nécessaires pour vérifier statistiquement les indices de sûreté de fonctionnement du système. Elle permet d'obtenir des résultats qui ne sont pas des solutions numériques précises, mais des intervalles de confiance qui contiennent ces solutions avec une probabilité définie.

Lors d'un échantillonnage, les événements sont sélectionnés au hasard suivant leur règle de probabilité. (Uniforme, normale, logarithmique, ...). A chaque nouvel événement, le système est évalué dans l'ordre chronologique afin de déterminer son efficacité. Les indices sont ensuite actualisés. L'avantage de cette méthode est que n'importe quelle loi de probabilité peut être utilisée, à la différence des méthodes précédentes qui nécessitaient l'utilisation de lois de probabilité exponentielles pour l'estimation des indices de sûreté du système.

Pour modéliser le système, il faut d'abord définir le fonctionnement des composants, puis celui du système. Il est possible de créer différents modèles pour un composant selon l'utilisation dont il fait l'objet.

Dans la description du système [72], il faut préciser le fonctionnement du système face aux défaillances pour chaque événement, c'est-à-dire toutes les étapes de :

- ✓ Détection de la défaillance
- ✓ Diagnostique de l'état du système
- ✓ Changement d'état de fonctionnement
- ✓ Maintien des composants endommagés
- ✓ Retour au fonctionnement

Cette description couvre la connaissance de l'état du système suite un événement, ainsi que les mesures correctives possibles. Cette description est la partie la plus difficile de cette méthode, Étant donné que chaque système fonctionne de manière spécifique.

Pour effectuer la simulation de Monte Carlo [72], il faut suivre les étapes décrites ci-dessous :

- ✓ Définir le système à partir un modèle,
- ✓ Génération des nombres aléatoires,
- ✓ Production de variables aléatoires,
- ✓ Mise à l'épreuve du modèle,
- ✓ Traitement statistique des résultats,
- ✓ Étude de la performance et de la convergence du modèle de simulation.

IV.4.7. Réseau de Petri

Les réseaux de Petri [69,72,73,111,128,129,130] ont été créés par le mathématicien allemand Carl Adam Petri en 1962. Ils sont fondés sur la théorie des automates. Grâce à leur représentation graphique et mathématique, ils constituent un outil de qualité pour créer des modèles de systèmes complexes. Ces réseaux servent à représenter le comportement d'un système dans des conditions normales de fonctionnement, ainsi que le comportement d'un système en cas de défaillance d'un composant.

Un réseau de Petri est un graphe formé principalement de deux types de nœuds :

- ✓ Les places qui décrivent les états du système modélisé.
- ✓ Les transitions pour représenter les changements d'état.

Il est représenté par un quadruplet $R = (P, T, Pre, Post)$ [131] :

Où : P est un ensemble fini de places,

T est un ensemble fini de transitions,

$Pre : P \times T \rightarrow IN$ (Ensemble des entiers naturels) est l'application incidence avant, reliant des transitions à des places précédentes,

$Post : T \times P \rightarrow IN$ est l'application incidence arrière, reliant des transitions à des places suivantes.

Un réseau de pétri est un graphe orienté biparti :

- ✓ Places et transitions sont reliées par des arcs orientés, où P et T sont des ensembles disjoints de nœuds orientés, qui représentent les places et les transitions. Le premier, qui est représenté graphiquement par des cercles, est utilisé pour modéliser les états ; le second, représenté graphiquement par des barres, est utilisé pour décrire les événements/activités qui peuvent se produire dans le système.
- ✓ Les places peuvent être marquées par une ou plusieurs marques dites " jetons " L'ensemble des jetons liés aux différentes places forme le marquage du réseau qui correspond à un état du système modélisé,
- ✓ De plus, les transitions sont représentées par des rectangles 'barre' et elles interviennent, sous certaines conditions, sur le marquage du réseau.

Les arcs dirigés $A = (P \times T) \cup (T \times P)$, représentés par des flèches, décrivent les places qui sont des pré-conditions, reliant une place à une transition (arc amont) ou des post-conditions pour les transitions, reliant une transition à une place (arc aval), ces places sont appelées respectivement places d'entrée et places de sortie. Il est possible de leur attribuer un poids (nombre positif). Par défaut, il est égal à 1 (voir figure IV.8)

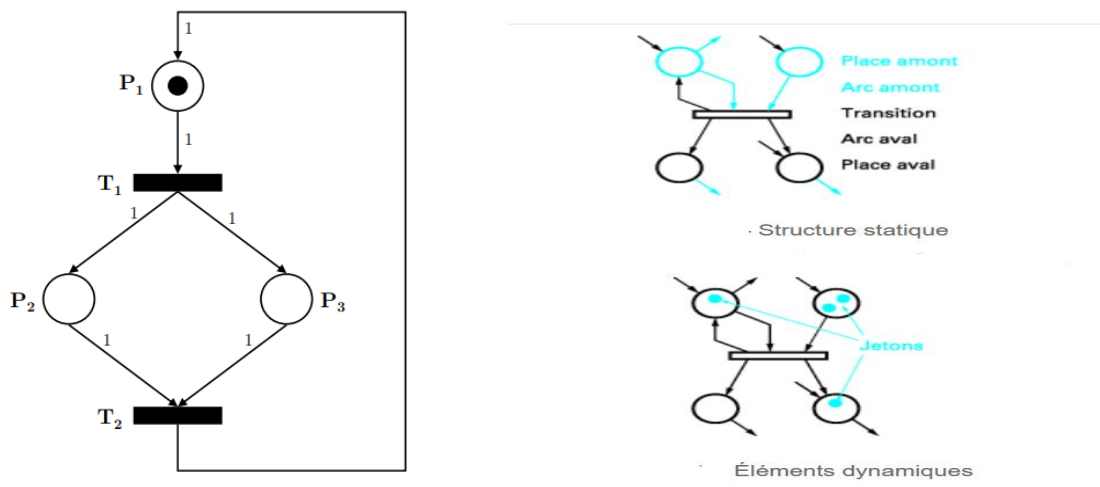


Figure IV.8. Exemple sur la structure du réseau de Petri [132]

IV.4.7.1. Sémantique -exécution pour évaluer un réseau de pétri

Dans le RdP [128,132], les transitions indiquent les événements qui risquent de se produire et qui seront utilisés pour faire évoluer le marquage. Pour cela, deux étapes sont essentielles :

- ✓ Validation (l'événement associé à la transition est devenu une possibilité).
- ✓ Tir (l'événement associé à la transition s'est effectivement produit).

Les principes de validation et tir d'une transition dans le RdP de base sont simples :

- ✓ Validation : au moins un jeton dans chaque place amont ;
- ✓ Tir : enlèvement d'un jeton dans chaque place amont et ajout d'un jeton dans chaque place aval.

Le comportement du réseau de pétri est régi par les règles d'activation et de désactivation des transitions. Une transition est activée dans un marquage donné, lorsque toutes ses places d'entrée contiennent au moins un jeton. Une transition activée peut être tirée et, lors du tirement, elle retire un jeton de chacune de ses places d'entrée et ajoute un jeton dans chacune de ses places de sortie. Ce qui entraîne un changement de marquage (c'est-à-dire un changement d'état).

Conformément à ces règles, la transition de la figure IV.8 « éléments dynamiques » est donc valide lorsque l'événement qui est associé à cette transition a lieu, on obtient le marquage RdP de la figure IV.9.

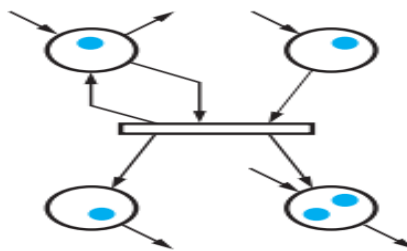


Figure IV.9. Développement du système par le tir des transitions [132]

Une fois que l'on a vu la façon concrète de représenter l'évolution d'un système à travers les tirs de transition, on doit identifier le moment où ces évolutions peuvent réellement se produire. Cette étape consiste, à partir d'un événement donné, à déterminer le délai entre le moment où l'événement sera possible (la transition est valide) et le moment où il se produira réellement (la transition est tirée). Ceci fait appel au réseau de pétri stochastique

Les RdP stochastiques résultent d'une extension des réseaux de Petri dans lesquels chaque transition est liée à une variable aléatoire temporelle ayant une fonction de densité de probabilité. Il existe trois types de RdP stochastiques [69,72,73,111,130,132] :

IV.4.7.2. RdP stochastiques classique :

Les délais liés à chaque transition sont des variables aléatoires ayant des lois de distribution exponentielles. Une chaîne de Markov peut être associée à ce RdP stochastique. Le graphe de Markov est dérivé directement du graphe d'accessibilité de la RdP stochastique en donnant à chaque arc un taux de transition d'un marquage à l'autre. Le taux de transition est le paramètre de la loi exponentielle qui détermine le temps nécessaire pour effectuer la transition correspondante. Le calcul des probabilités instantanées pour les différents états est tiré du graphe de Markov.

IV.4.7.3. RdP stochastiques généralisés :

RdP-SG résultent d'une extension des réseaux de Petri stochastiques classiques, où Les délais associés aux transitions temporisées dans le RdP stochastique généralisé suivent des lois de distribution exponentielles, et certaines transitions dites immédiates tirées. (Franchies dès que la validation est effectuée). Un RdP stochastique généralisé possède deux sortes d'états : des états réels dans lesquels toutes les transitions sensibilisées sont temporisées, et des états virtuels dans lesquels toutes les transitions sensibilisées sont immédiates. Une fois les états virtuels retirés, une évaluation du marquage sera toujours considérée comme un modèle markovien homogène.

IV.4.7.4. RdP stochastiques déterministes :

Dans les RdP-SD, les délais liés aux transitions temporisées suit des lois de distribution exponentielles ou autres et certaines transitions ont lieu instantanément.

Le réseau de Petri permet avant tout d'analyser le comportement d'un système en présence de défaillances. En attribuant des valeurs numériques aux paramètres du modèle, cette modélisation dynamique permet de générer des mesures liées à la fiabilité. La méthode des réseaux de Petri permet de modéliser, d'une part, le fonctionnement habituel d'un système et, d'autre part, les défaillances qui peuvent survenir [73,133]

IV.4.8. Graphes de Markov

Le terme de chaîne a été utilisé pour la première fois en 1902 par Andrei Markov pour formaliser des problèmes d'épistémologie et de cryptage. Ce n'est que vers 1940-1950 qu'un formalisme beaucoup mieux adapté, connu sous le nom de "chaîne de Markov" ou méthode de l'espace d'état (MSE), est apparu afin d'analyser la fiabilité des systèmes réparables [111,125,126,127].

L'analyse de Markov [101] est une technique stochastique permettant de spécifier la dépendance des caractéristiques de défaillance ou de réparation des composants individuels par rapport à l'état du système. C'est une technique appropriée pour évaluer la fiabilité des structures de systèmes complexes et des stratégies de réparation et de maintenance complexes. Il convient de noter que l'analyse de Markov représente souvent la base de certains formalismes introduits précédemment, tels que Réseau de Petri stochastique.

Le modèle de Markov le plus simple est une chaîne de Markov [101], c'est-à-dire un processus de Markov avec un espace d'état discret. Une chaîne de Markov peut être définie pour un ensemble discret de temps (c'est-à-dire, chaîne de Markov à temps discret - CMTD) ou pour un temps prenant des valeurs réelles non négatives (temps continu), (C'est-à-dire, chaîne de Markov à temps continu-CMTC).

Pour les applications de sûreté de fonctionnement, le modèle de référence normal est la chaîne de Markov à temps continu.

Cette méthode [69,72,111 ,114] vise à représenter le fonctionnement d'un système par un ensemble de composants qui peuvent exister dans un nombre fini d'états de fonctionnement et de défaillance. Pour visualiser les différents états d'un système, on peut utiliser un aide graphique (le graphe d'état), lequel est représenté par des cercles reliés entre eux par des arcs orientés qui correspondent aux transitions entre les états ("pannes" et "réparations").

Le graphique est composé de sommets correspondant aux différents états du système, représentés par des cercles. Ces derniers sont reliés par des arcs orientés qui ont un taux de transition (ou une probabilité) non-nul lié aux événements qui représentent les conditions de transition ("pannes" λ et "réparations" μ) qui permettent au système de passer d'un état à un autre (voir figure IV.10). Dans le cas d'un système à n composants, où chaque composant a deux états (fonctionnement et défaillance), le nombre maximal d'états est le suivant : 2^n . Le modèle comporte une partie graphique et une écriture matricielle (Matrice de transition).

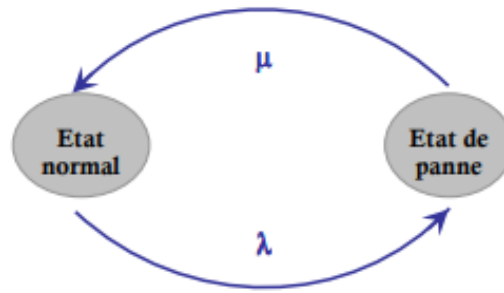


Figure IV.10. Modèle markovien

Les traitements tournent autour d'un calcul matriciel : à chaque instant t , la probabilité d'occupation d'un état du système est déterminée uniquement par la distribution initiale des états (à $t = 0$) et la matrice de transition.

Les résultats sont quantitatifs : probabilités d'occupation de l'état, fréquence d'événements, etc., en régime transitoire ou permanent.

IV.4.9. Réseaux bayésiens

Le réseau bayésien est un modèle graphique probabiliste utilisé pour représenter et étudier les relations causales existant entre les variables d'un système. Ils servent à modéliser des situations complexes caractérisées par l'incertitude et la variabilité, ainsi que pour aider à la prise de décision et plus spécifiquement au développement de nouvelles stratégies permettant la maintenance des systèmes complexes par le biais du diagnostic. À cet effet, les réseaux bayésiens constituent le sujet d'un chapitre détaillé qui suivra le présent chapitre, vu qu'il s'agit de la méthode adoptée pour le développement de ce travail.

IV.5. Méthodes pour maîtriser les risques : limites et avantages

Une bonne connaissance sur les avantages et les limites de chaque méthode est essentielle pour pouvoir choisir celle qui convient le mieux aux objectifs et aux contraintes du système étudié.

Le tableau IV.2 donne un aperçu sur les avantages et les limites des méthodes d'analyse que nous avons choisies pour élaborer notre étude.

Tableau IV.2. Synthèse sur les avantages et les limites des méthodes d'analyse des risques

Méthode	Limites	Avantages
AMDEC	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elle est surtout axée sur les modes de défaillance et leurs effets potentiels, sans tenir compte les interdépendances qui existent entre les différents composants du système. De plus, elle est limitée par sa capacité à traiter d'autres défaillances causées par divers facteurs. ✓ Vu le nombre important d'informations à traiter et l'impossibilité de définir des défaillances multiples, la méthode est extrêmement difficile à maîtriser. ✓ Pour compléter l'analyse, des méthodes supplémentaires, comme les arbres de défaillances, sont utilisées. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Recensement précoce des défaillances éventuelles : L'AMDEC offre la possibilité de repérer les défaillances possibles dès la phase de conception, de sorte que des mesures correctives peuvent être prises bien avant le début de la production. ✓ Une telle démarche couvre la plus grande partie du cycle de vie d'un système : la conception, la maintenance, test, etc. ✓ Elle permet de rendre un système plus fiable et de prolonger sa durée de vie, ce qui peut réduire les coûts liés à l'entretien et à la réparation des équipements sur le long terme.
HAZOP	<ul style="list-style-type: none"> ✓ HAZOP ne permet pas facilement de déterminer les événements causés par la combinaison simultanée de nombreuses défaillances. En outre, l'attribution d'un mot-clé à une partie bien définie du système à examiner peut parfois s'avérer difficile. Il est alors plus difficile d'identifier toutes les raisons possibles d'une dérive. ✓ Les systèmes considérés sont fréquemment constitués d'éléments interconnectés, de telle sorte qu'une dérive dans une ligne ou une maille peut avoir des implications ou des causes dans une autre, et vice versa. Bien évidemment, les conséquences d'une 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Une méthode systématique particulièrement adaptée aux systèmes thermo- hydrauliques. ✓ Cette méthode [36] convient à la quasi-totalité des opérations dans l'industrie. Elle est particulièrement bien adaptée à l'étude des grandes installations, car elle permet de définir la séquence détaillée des événements susceptibles de provoquer un accident majeur. ✓ Méthode pluridisciplinaire [36] permet d'analyser les risques par un groupe de travail diversifié permet de recourir au brainstorming, une activité de groupe qui favorise la libre pensée et la liberté de

	<p>dérive peuvent être transférées d'un élément du système à un autre a priori. Mais cette étape risque de devenir rapidement compliquée.</p> <p>✓ Consommatrice de temps [36] : HAZOP se caractérise souvent par son aspect "lourd". Cette critique est justifiée par le fait que les deux étapes essentielles de la méthode, à savoir : la nécessité de rassembler une équipe pluridisciplinaire et de recueillir divers documents pour modéliser l'installation, peuvent prendre beaucoup de temps.</p>	<p>discussion, source de créativité, ainsi que la prise en compte des points de vue de chacun.</p>
<p>AdD</p>	<p>✓ Cette méthode nécessite une compréhension approfondie des scénarios d'événements, ainsi que de son fonctionnement et de ses interactions avec son environnement.</p> <p>✓ Dans le cas des systèmes complexes ou d'événements indésirables trop génériques ou mal spécifiés, la lisibilité des arbres de défaillance peut devenir très compliquée.</p> <p>✓ Elle exige des données fiables et précises, qui sont parfois difficiles à obtenir.</p> <p>✓ La prise en compte des dépendances n'est pas assurée ainsi que les effets du comportement physique et dynamique du système</p> <p>✓ Pour l'élaboration de l'arbre, cela est souvent chronophage, en particulier pour les systèmes complexes qui nécessitent des données difficiles à trouver.</p>	<p>✓ Étude prioritaire des défaillances liées à des événements redoutés dont la gravité de production est plus élevée. Elle permet la prise en compte des combinaisons d'événements qui peuvent mener à un événement redouté.</p> <p>✓ La lisibilité offerte par la représentation graphique des combinaisons de causes conduisant à des défaillances est un autre point fort.</p> <p>✓ Les coupes minimales constituent des résultats synthétiques qui indiquent clairement la criticité des composants.</p> <p>✓ De nombreuses défaillances et causes communes peuvent être prises en compte dans l'analyse.</p>

	✓ Le système est vu de manière purement statique.	
AdE	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La méthode de l'arbre d'événements permet de suivre la progression des événements initiaux jusqu'à la survenue d'un événement dangereux. ✓ Déterminer la fréquence d'un scénario catastrophique 	✓ Si les événements initiateurs ne sont pas bien définis, le processus risque de devenir rapidement pénible. Il est donc essentiel de choisir les événements qui peuvent réellement conduire à des situations critiques

IV.6. Comment bien choisir une méthode d'analyse des risques ?

Les critères importants pour le choix d'une bonne méthode par rapport à une autre dans l'étude d'un système spécifique en particulier ont été retenus :

- ✓ Domaine du projet sur lequel porte la recherche.
- ✓ La phase d'étude désigne le stade d'avancement de l'étude, c'est-à-dire s'il s'agit de la spécification, de la conception, de la démantèlement ou d'autres étapes de l'étude.
- ✓ La manière dont les risques sont perçus dans ce domaine.
- ✓ Culture organisationnelle de sûreté de fonctionnement, elle se fait par sensibilisation collective aux risques liés aux activités de l'organisation.
- ✓ Aspects du problème à étudier.
- ✓ Degré de performance attendu en matière de sécurité.
- ✓ L'expertise des intervenants.
- ✓ Type d'informations qui sont disponibles (caractéristiques du système et de ses interfaces, restrictions, etc.)
- ✓ Retour d'expérience et base de données disponibles.
- ✓ Ressources humaines, logistiques et autres Moyens.
- ✓ On peut aussi citer d'autres restrictions en matière de gestion de projet, notamment les délais.

Cependant, une seule méthode d'analyse des risques peut ne pas donner une vision complète du degré auquel les objectifs de sécurité ont été atteints. En effet, il est nécessaire de combiner plusieurs méthodes en raison de leurs qualités majeures, qui leur confèrent des rôles privilégiés pour plus d'exhaustivité et de cohérence en termes de résultats.

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de mieux comprendre le contexte, les démarches et méthodes d'analyse des risques. Nous avons tout d'abord abordé l'objectif de l'analyse fonctionnelle des systèmes, qui consiste à déterminer les principales fonctions du système, identifier les composants, leur rôle et les restrictions de fonctionnement du système.

Nous avons ensuite présenté les modes de raisonnement de l'analyse prédictive, en soulignant les différences entre les méthodes inductives/déductives, qualitatives/quantitatives et statiques/dynamiques. Nous avons également mis en évidence les méthodes les plus couramment utilisées dans l'analyse de la sûreté de fonctionnement, ainsi que le mode de leurs fonctionnements.

Suite à l'identification des avantages et des limites des méthodes d'analyse utilisées dans le développement de notre étude, le choix des critères de sélection d'une méthode d'analyse de risque est une étape intéressante car il est essentiel de noter que la méthode d'analyse des risques adoptée doit être définie en se basant sur les caractéristiques du système considéré, les objectifs de l'analyse et les contraintes de temps et de coût. La complexité du système, la nature des dangers, la disponibilité des ressources d'information telles que les bases de données, l'expertise de l'équipe d'analyse et les dépenses associées sont autant de critères de sélection.

Dans le prochain chapitre, nous allons discuter à nouveau l'approche bayésienne et son utilisation en matière de sûreté de fonctionnement. Nous allons également présenter le passage de l'arbre de défaillances aux réseaux bayésiens, ainsi que la détermination des facteurs d'importances par l'inférence bayésienne.

Chapitre V

Démarche bayésienne pour l'analyse des risques

Sommaire du chapitre :

V.1. Introduction	128
V.2. Réseau bayésien : une vue d'ensemble historique et théorique	129
V.2.1. Présentation de l'approche Bayésienne : Théorème de Bayes.....	129
V.2.2. Caractéristiques des réseaux bayésiens.....	131
V.2.3. Inférence bayésienne.....	133
V.2.4. Optimisation du réseau bayésien : méthodes de simplification	134
V.2.5. Modélisation dynamique par les réseaux bayésiens	134
V.2.6. Réseaux Bayésiens : un outil prometteur pour la modélisation probabiliste	135
V.2.7. Réseaux bayésiens : contraintes et limites	136
V.3. Analyse et gestion des risques à l'aide du réseau bayésien	137
V.3.1. Application des réseaux bayésiens comme outil pour analyser les risques	137
V.3.2. Interprétation de AdD en RB pour l'analyse des risques.....	138
V.3.2.1. Structure du réseau bayésien à partir de l'arbre des défaillances : conditions pour une mutation de l'AdD au RB	140
V.3.2.2. Réseau bayésien issu à partir d'arbre de défaillance en présence des événements répétés.....	143
V.3.2.3. L'inférence RB générée par AdD.....	145
V.3.3. Facteur d'importance probabiliste en RB	146
V.4. Conclusion.....	147

V.1. Introduction

Savoir évaluer le comportement des systèmes est un point essentiel afin d'assurer la performance, la fiabilité et au final la sécurité du système. Les méthodes d'analyse classiques consistent à étudier systématiquement les différents composants du système de manière à comprendre leur impact sur le fonctionnement du système dans son ensemble. Toutefois, ces méthodes peuvent être insuffisantes dans certaines situations, notamment dans les systèmes complexes ayant de nombreux composants interconnectés, ou encore dans les situations où les interactions entre composants sont difficilement quantifiables.

Les méthodes d'évaluation classiques risquent également de ne pas tenir compte des effets des facteurs externes, comme les changements survenus dans l'environnement, les fautes commises par les humains ou les fluctuations du marché. Il est donc devenu de plus en plus vital de créer des modèles d'évaluation plus avancés, capables de tenir compte de l'interaction complexe qui existe entre un système et les facteurs externes. Afin de réaliser une étude de la fiabilité d'un système qui se rapproche de la réalité, il est nécessaire de faire des inférences probabilistes sur la base de données récoltés (bases de données, retour d'expérience, etc.) [69]. La progression des outils d'analyse des données, de modélisation et de simulation a permis de créer de nouvelles approches pour étudier la performance des systèmes. Pour évaluer l'impact de chaque composant sur le système, ces approches font souvent appel à des techniques avancées comme les réseaux bayésiens, les réseaux neurones, et bien d'autres méthodes. De telles nouvelles méthodes tiennent également compte des éventuels facteurs externes pouvant affecter le fonctionnement du système, afin de renforcer la fiabilité et la sécurité du système.

L'approche bayésienne, adoptée pour la réalisation de notre étude comme alternative aux méthodes classiques, offre une grande fiabilité des systèmes en termes de prise de décision en temps réel via des données actualisées (retour d'expérience, avis d'experts, données de maintenance...).

Ce type d'approche est particulièrement adapté car il permet d'obtenir le plus d'informations sur le système en considérant l'ensemble des données des composants selon leurs différents états (état de fonctionnement, de standbys, de défaut ou de maintenance), soit en mettant à jour les données, soit en effectuant une inférence sur le réseau bayésien. Cette nouvelle information, qui sera une connaissance a priori, est utilisée pour évaluer le système en temps réel pour une aide à la décision précise grâce aux probabilités obtenues a posteriori, afin

de garantir un niveau élevé de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et enfin une sécurité globale du système [69].

L'objectif de ce chapitre est de présenter le formalisme principal de modélisation mis en œuvre dans cette thèse, à savoir les théories des probabilités et des graphes, ainsi que leur pertinence et leur efficacité pour modéliser des systèmes en partant de données aprioriques. Le modèle est créé à partir d'un arbre de défaillance, un outil classique d'analyse quantitative des risques, vers un réseau bayésien. Ensuite, en utilisant l'inférence bayésienne pour déterminer les facteurs d'importance probabilistes.

V.2. Réseau bayésien : une vue d'ensemble historique et théorique

Les réseaux bayésiens ont acquis un certain attrait parmi les modèles graphiques probabilistes du fait de leur capacité à présenter des connaissances incertaines ou probabilistes et les raisonner. Ils tiennent leur nom de Thomas Bayes, un mathématicien qui a développé la théorie des probabilités au XVIIIe siècle.

Dans les années 1980, Judea Pearl [137] a été l'initiateur des réseaux bayésiens. Ils sont rapidement devenus des outils très utiles pour décrire les connaissances incertaines de manière formelle et rigoureuse. Ces modèles peuvent être utilisés pour anticiper des événements futurs sur la base d'informations connues et pour identifier les facteurs les plus susceptibles d'influencer le fonctionnement d'un système [69,72,73,88,130,138,139,140].

V.2.1. Présentation de l'approche Bayésienne : Théorème de Bayes

Dans le théorème de Bayes, il est possible de considérer deux types d'informations : [69, 88,141] la connaissance de base, appelée a priori, qui repose sur des informations préalables ou des croyances subjectives issues du jugement des experts ou d'un retour d'expérience, et la vraisemblance, qui correspond aux observations du retour d'expérience, pour obtenir une meilleure connaissance avec une incertitude plus faible : la probabilité a posteriori représente donc la nouvelle connaissance de l'expert. Il convient de noter que si de nouvelles informations provenant du retour d'information deviennent disponibles, le résultat a posteriori peut devenir la connaissance a priori. C'est le principe de la mise à jour dynamique des connaissances, qui est particulièrement applicable aux bases de données.

L'application de l'approche bayésienne à l'analyse quantitative des risques d'un système revient à appliquer l'inférence bayésienne définie dans la figure V.1. La règle de Bayes permet

de combiner l'information subjective et l'information objective, Elle permet d'estimer [69,88,130] les probabilités d'occurrence d'événements futurs (probabilités a posteriori) à partir des probabilités d'occurrence d'événements passés similaires (probabilités a priori), exprimées par la formule de Bayes, peut être considérée comme une actualisation des connaissances, sur le réseau bayésien, dans le but de créer un modèle d'aide à la décision.

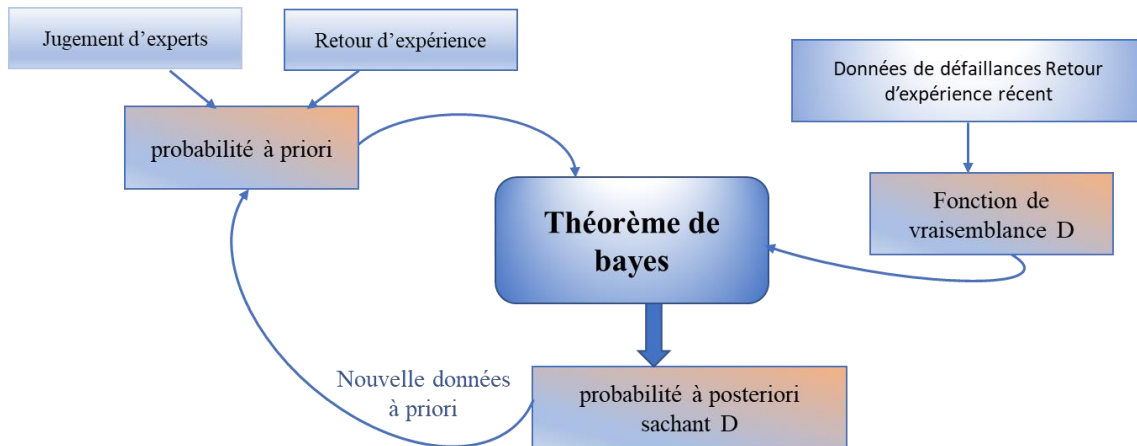


Figure V.1. Principe de l'inférence bayésienne

La formule mathématique du théorème de Bayes [69,88,142], exprimées par la corrélation suivante :

- Formule de Recomposition

$$\forall A \in I : P(A) = \sum_i^n P(A|B_i) \times P(B_i) \quad (V-1)$$

- Formule de Bayes

$$P(B_i|A) = \frac{P(A|B_i) \times P(B_i)}{\sum_i^n P(A|B_i) \times P(B_i)} \quad (V-2)$$

Ce qui signifie que la probabilité conditionnelle de produire un événement B sachant qu'un événement A s'est réalisé est proportionnelle à la probabilité (a priori) de B (probabilité avant d'observer A) multipliée par la probabilité d'observer A en connaissant B.

Où ;

B : événement examiné,

A : événement(s) observé(s)

P(B) : probabilité à priori de B,

$P(A/B)$: fonction de vraisemblance

$P(B/A)$: probabilité à postériori de B.

Un exemple illustrant le théorème de Bayes

Un bâtiment est équipé d'un système de détection d'incendie. Le système a 97 % de chances de détecter un incendie s'il se produit ($P(A|B) = 0,97$), et la probabilité qu'il émette une fausse alarme est de 0,6 % ($P(A|\bar{B}) = 0,006$). La question qui se pose si l'alarme se déclenche, quelle est la probabilité que le bâtiment soit réellement touché par un incendie, sachant que la probabilité qu'un incendie se développe est de 0,2 % ($P(B) = 0,002$).

En utilisant le théorème de Bayes comme réponse à cette question. Il s'agit de calculer $P(B|A)$ qui est égale à :

$$= \frac{P(A/B) \times P(B)}{P(A/B) \times P(B) + P(\bar{B}) \times P(A/\bar{B})} = \frac{0,97 \times 0,002}{0,97 \times 0,002 + 0,006 \times 0,998} \approx 0,245 \quad (V-3)$$

V.2.2. Caractéristiques des réseaux bayésiens

La manière la plus simple d'exprimer l'influence d'un événement, d'un élément ou d'une variable sur un autre consiste à relier la cause et l'effet au moyen d'une flèche orientée [139]. La figure V.2 représente un graphe acyclique dirigé.

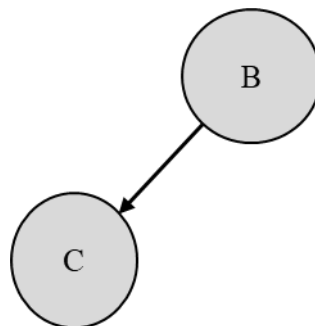


Figure V.2. Graphe acyclique dirigé : B est la cause de C

Afin de créer un réseau bayésien, il faut d'abord construire un réseau acyclique orienté, ensuite évaluer la distribution de probabilité conditionnelle dans chaque nœud. Un réseau bayésien [69,139] comprend les éléments suivants :

Un graphe acyclique dirigé G , $G = (V, A)$ où V est l'ensemble des nœuds de G et A l'ensemble des arcs de G .

Chapitre V : Démarche bayésienne pour l'analyse des risques

$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ un ensemble de variables aléatoires associées aux nœuds du graphe G.

Un ensemble de distributions de probabilités conditionnelles « CPD » pour chaque nœud :

$$P(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) = \prod_{i=1}^n P(Y_i | Par(Y_i)) \quad (V-4)$$

Où : $Par(Y_i)$ est l'ensemble des causes (parents) de Y_i dans le graphe G

La première propriété est donc, un réseau bayésien est un graphe causal doté d'une représentation sous-jacente des probabilités. Cette forme permet un raisonnement quantitatif sur les causalités qui peuvent être effectués sur le graphe.

Le réseau bayésien [113] est un outil qui permet d'analyser le système en deux manières différentes : Premièrement, une représentation qualitative sous la forme d'un graphe acyclique direct DAG, qui est un modèle composé d'un ensemble de nœuds représentant des variables aléatoires liées par des arcs qui décrivent les liens de causalité entre les variables, un aspect qualitatif du graphe illustre les dépendances (ou les indépendances) entre les variables et fournit un outil visuel pour la présentation des connaissances, un aspect qui est plus facile à comprendre par les utilisateurs. D'autre part, sur le plan quantitatif, en se basant sur les expressions mathématiques du théorème de Bayes en présentant

des tables de probabilités conditionnelles (CPT) figure V.3, en utilisant ces probabilités, on peut prendre en compte les incertitudes en quantifiant les dépendances qui existent entre les variables.

Pour mieux comprendre les concepts associés aux réseaux bayésiens, reprenons l'exemple précédent

Un bâtiment est équipé d'un système de détection d'incendie. Le système a 97 % de chances de détecter un incendie s'il se produit ($P(A|B) = 0,97$), et la probabilité qu'il émette une fausse alarme est de 0,6 % ($P(A|B') = 0,006$). La question qui se pose si l'alarme se déclenche, quelle est la probabilité que le bâtiment soit réellement touché par un incendie, sachant que la probabilité qu'un incendie se développe est de 0,2 % ($P(B) = 0,002$)

Il s'agit de calculer $P(B|A)$ égal à :

$$= \frac{P(A/B) \times P(B)}{P(A/B) \times P(B) + P(\bar{B}) \times P(A/\bar{B})} = \frac{0,97 \times 0,002}{0,97 \times 0,002 + 0,006 \times 0,998} \approx 0,244 \quad (V-5)$$

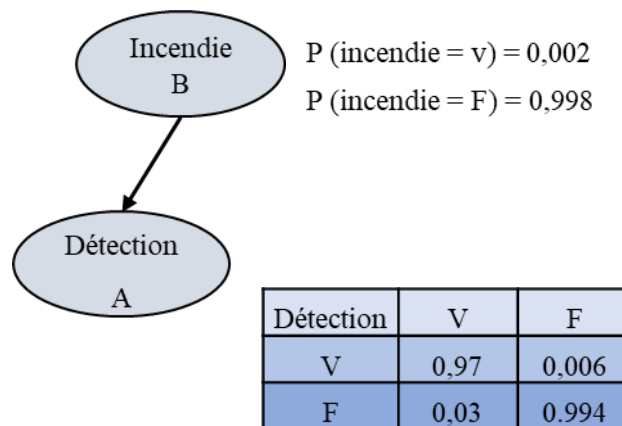


Figure V.3. Réseau bayésien d'un système de détection d'incendie.

La réponse est de fixer un scénario A (vrai) à 100 % et de vérifier la nouvelle valeur de B. Nous trouvons que $P(B|A) = 24,47 \%$, comme le montre la figure V.4.

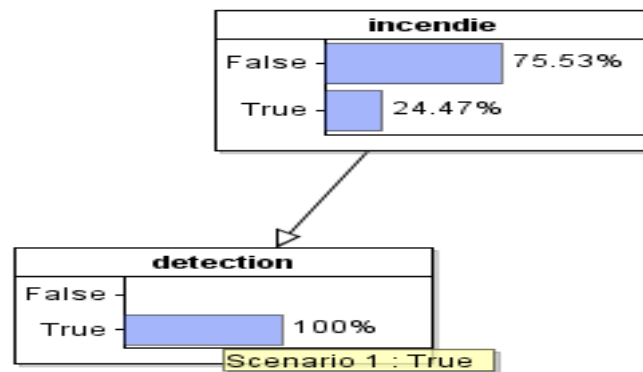


Figure V.4. simulation d'un système de détection d'incendie

V.2.3. Inférence bayésienne

Sur la base d'observations d'événements déjà connus, l'inférence bayésienne (ou le raisonnement bayésien) permet de déterminer les probabilités de différentes causes hypothétiques. Au fur et à mesure que les preuves s'accumulent en faveur ou à l'encontre d'une hypothèse, le raisonnement bayésien consolide ou réduit la confiance envers cette hypothèse. L'inférence bayésienne relie les connaissances a priori aux nouvelles connaissances de la manière la plus efficace possible [143].

Une hypothèse peut être vraie ou fausse sur la base d'observations plutôt que sur la base de sa relation logique avec des axiomes considérés comme absolument vrais. Toute hypothèse se voit attribuer une valeur comprise entre 0 (certainement fausse) et 1 (certainement vraie). Lorsque l'événement a plus de deux issues possibles, le modèle propose une distribution de probabilité pour ces issues. Cette distribution est revue à chaque fois qu'une nouvelle observation est faite et devient de plus en plus affinée [143].

Le problème de l'inférence [69,72,139] est entièrement lié au calcul. Aucun problème théorique ne se pose, étant donné que la distribution de probabilité est bien définie, il est possible (en principe) de tout calculer.

V.2.4. Optimisation du réseau bayésien : méthodes de simplification

En réalité, dans un réseau bayésien, le nombre d'entrées dans les tables de probabilités conditionnelles peut rapidement arriver à des nombres assez importants, en particulier lorsque le nombre de parents dans le réseau est élevé. Dans le cas d'une variable de m états et k parents, il est égal à m^k . Cela peut compliquer la manipulation du modèle et nécessiter la collecte d'une grande quantité de données pour estimer les probabilités conditionnelles.

Une simplification du réseau bayésien peut remédier à ce problème en recherchant une corrélation entre certaines variables et en remplaçant certaines d'entre elles par d'autres plus facilement observables. Cependant, comme ces méthodes risquent d'entraîner un manque de précision du modèle, il est essentiel d'évaluer tous au préalable certains avantages et inconvénients avant de mettre en œuvre une telle méthode de simplification.

Comme l'utilisation de la porte logique "ou" peut être avantageuse dans certains cas, notamment lorsque de nombreuses variables ont des parents communs. Cela rend possible une croissance linéaire du nombre de probabilités des variables spécifiées en fonction du nombre de leurs parents. Ceci a pour conséquence de réduire le nombre de cases dans les tables de probabilités conditionnelles et de simplifier l'estimation des probabilités. Toutefois, cette hypothèse peut entraîner des biais dans le modèle, il est donc nécessaire de s'assurer qu'elle est valide avant de l'utiliser.

V.2.5. Modélisation dynamique par les réseaux bayésiens

Un simple RB a été défini comme un modèle discret. Ces derniers temps, de nombreuses études [69,139,144,145] ont été menées en vue de développer la notion du réseau bayésien et

de la rendre beaucoup plus pertinente. Les réseaux bayésiens, à titre d'exemple, sont en mesure de prendre en compte la continuité des événements dans le temps.

Une extension des réseaux bayésiens, appelés réseaux bayésiens dynamiques (RBD), a été proposée quand un certain nombre de variables changent d'état en fonction du temps lorsque les paramètres du système varient au fil du temps [146,147]. Les RBD conviennent donc parfaitement à la modélisation de systèmes qui varient dans le temps où le terme dynamique désigne tout changement subi par le système comme un changement d'état.

V.2.6. Les Réseaux Bayésiens : un outil prometteur pour la modélisation probabiliste

Dans la pratique, un réseau bayésien est appliqué de la même manière que d'autres modèles [69,145] : réseau de neurones, arbre de décision, arbre de défaillance, etc. Bien évidemment, la technique choisie est dictée par une série de critères, comme la convivialité, le coût et le temps requis pour la mise en œuvre d'une solution. Outre les aspects théoriques, les particularités décrites ci-dessous font que les réseaux bayésiens sont nettement plus efficaces que d'autres modèles dans de nombreux cas :

- Capacité à intégrer plusieurs types de connaissances dans un seul modèle : retour d'expérience, observations et expertise. Les réseaux bayésiens peuvent rassembler et fusionner des connaissances acquises afin d'accroître la précision et la fiabilité des prédictions.
- Facilité de l'interprétation : La représentation graphique d'un réseau bayésien est à la fois, intuitive et intelligible par un non-spécialiste, à la différence de certains modèles de machine learning, les réseaux bayésiens sont souvent plus faciles à interpréter et à expliquer, ce qui facilite à la fois la validation du modèle, son évolution possible et en particulier son utilisation.
- La flexibilité du réseau bayésien permet d'utiliser le même modèle pour diverses tâches telles que l'analyse, la prédiction, le diagnostic ou encore l'amélioration des décisions, ce qui rentabilise l'effort de création d'un réseau bayésien.
- Les réseaux bayésiens deviennent de plus en plus répandus pour simuler des systèmes complexes et porter des jugements dans une variété de domaines. De nombreux outils logiciels permettant de saisir et de traiter les réseaux bayésiens ont été créés pour faciliter leur utilisation. Ces outils contiennent une variété de caractéristiques qui leur permettent : d'intégrer des variables continues et de décision, un apprentissage des probabilités, un apprentissage de la structure du réseau bayésien, etc. Ils permettent

donc de créer des réseaux bayésiens rapidement et efficacement, ce qui les rend plus utiles.

V.2.7. Réseaux bayésiens : contraintes et limites

- ✓ L'application des probabilités : La représentation graphique des causes est une technique très intuitive. Cependant, le concept de probabilité n'est pas si évident à comprendre, il est donc possible de créer des paradoxes ou des raisonnements complexes. Contrairement aux modèles déterministes, même si ces modèles peuvent être réinterprétés dans un formalisme probabiliste, comme les réseaux de neurones ou les arbres de décision, ces modèles restent plus faciles à aborder.
- ✓ Clarté des graphes : même si les connaissances traitées dans les réseaux bayésiens ou tirées des données par les algorithmes d'apprentissage qui leur sont associés sont compréhensibles du fait qu'elles sont présentées sous forme de graphes, elles restent plus illisibles que celle d'un arbre de décision, par exemple, en particulier lorsque ce graphe comporte des nœuds en très grand nombre. Il convient également de noter que l'information représentée via le graphe correspond à la structure de causalité. Les probabilités n'étant pas représentables, nous ne pouvons pas comprendre l'importance d'un arc donné simplement en lisant le graphique.
- ✓ Difficulté de calcul « complexité des algorithmes » : en raison de l'étendue de leur formalisme, tant en termes de représentation que d'application, les algorithmes nécessaires pour traiter les réseaux bayésiens peuvent devenir complexes, ce qui les rend difficiles à manipuler lorsqu'ils dépassent une certaine taille. Les problèmes sous-jacents à la complexité des réseaux bayésiens sont presque tous de nature non polynomiale, ce qui nécessite le développement d'algorithmes approchés, qui ne peuvent pas être garantis pour des situations à grande échelle. Cela signifie que ces algorithmes peuvent ne pas produire de réponses exactes ou ne pas converger vers une solution optimale. Par conséquent, les algorithmes peuvent avoir un comportement parfois imprévisible.
- ✓ Les réseaux bayésiens sont fondés sur des modèles mathématiques de probabilité qui reposent sur des hypothèses concernant les causalités entre les variables. Par conséquent, si ces hypothèses sont incorrectes ou mal définies, il est probable que les prédictions du modèle soient erronées ou inexactes. Dans le cas, par exemple, où un modèle bayésien permet de prédire le niveau de risque d'une maladie affectant une population, des liens de causalité sous-jacents mal définis entre les facteurs de risque peuvent conduire à des prédictions fausses et, par conséquent, à des implications

négatives en termes de santé publique. Par ailleurs, le fait que les données utilisées pour élaborer le modèle soient incomplètes ou peu fiables peut empêcher le modèle de refléter avec précision et robustesse les liens de cause à effet.

V.3. Analyse et gestion des risques à l'aide du réseau bayésien

V.3.1. Application des réseaux bayésiens comme outil pour analyser les risques

Les réseaux bayésiens sont couramment employés pour modéliser les liens de causalité qui existent entre des événements incertains. Dans le présent contexte, ces réseaux permettent ainsi de définir des scénarios de risque, de quantifier la probabilité de survenue de ces scénarios, d'évaluer leur impact et de proposer des mesures préventives adaptées à ce type de situation [113,116,148,149,150].

Ils offrent de nombreux avantages [135] qui les rendent utiles pour répondre aux problèmes d'inférence, de classification et de prise de décision. Les RB sont très adaptés au traitement des données manquantes [157], et ils peuvent produire des prédictions précises même avec de petits ensembles de données [158]. Par conséquent, elles sont idéales pour l'analyse de données limitées. Les RB peuvent aisément combiner des connaissances issues de plusieurs sources, telles que des connaissances d'experts et des données mesurables. Ils sont utilisés pour déterminer les sources d'un accident, par exemple l'effondrement d'un tunnel. Ils servent également à replacer les arbres de défaillance et les arbres d'événements dans l'analyse des arbres logiques et représentent un véritable outil d'analyse décisionnelle [159].

Cette technique est fortement mise en avant dans les approches de sûreté de fonctionnement pour le traitement des données : cela revient à dire que les réseaux bayésiens sont couramment employés dans le domaine de la sûreté de fonctionnement pour évaluer et traiter les données relatives aux événements susceptibles de se produire dans un système. Une telle méthode offre la possibilité de modéliser les liens de cause à effet entre ces événements, ce qui permet de mieux connaître les risques et de prendre des décisions plus éclairées en termes de sécurité.

Il s'agit d'une information générale [69,149,154], le taux d'utilisation des réseaux bayésiens dans le domaine de l'analyse des risques est de 26% et celui de la fiabilité des systèmes est de 61%. De ce fait,

Ces études montrent l'importance des réseaux bayésiens dans le domaine de la sûreté de fonctionnement et leur capacité à intervenir dans l'analyse des risques et l'évaluation de la

fiabilité des systèmes. Par conséquent, cette information vient consolider la méthodologie de notre étude de cas, qui sera présentée dans cette thèse.

V.3.2. Interprétation de AdD en RB pour l'analyse des risques

De nombreuses études mentionnées dans le tableau V.1 ont prouvé la compatibilité entre l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens afin de développer des algorithmes aptes à convertir l'arbre de défaillance issu des méthodes classiques en réseaux Bayésien, qui comptent aujourd'hui parmi les méthodes les plus efficaces et les plus couramment utilisées en intelligence artificielle. Dans le but de créer un modèle décisionnel efficace pour les études de sûreté de fonctionnement, les auteurs [69,149,150,151,152] montrent comment un AdD peut être mis en correspondance avec un RB et que toutes les analyses effectuées par les méthodes AdD par le biais d'ensembles de coupes minimales peuvent être réalisées dans un RB. En outre, de nouvelles analyses sont également possibles, comme le calcul de la probabilité a posteriori d'une défaillance donnée du système. Par conséquent, tout AdD correspond à une RB et toutes les techniques utilisées dans un AdD peuvent être exécutées dans un RB, mais ce dernier permet des solutions de modélisation plus avancées [152].

Tableau V.1 Quelques études menées dans le cadre du passage de l'arbre de défaillance vers les réseaux bayésiens.

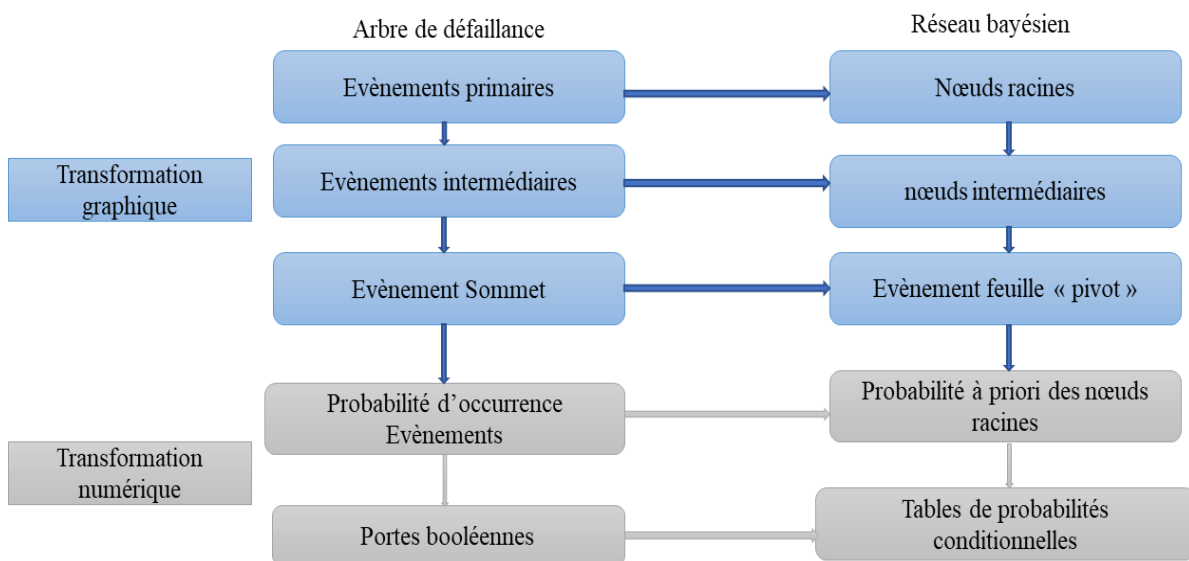
Référence	Domaine d'application	Méthodologie proposées
[113]	Modélisation du scénario d'incendie de four par un arbre de défaillance, un réseau bayésien et une méthode de calcul thermique afin d'analyser la fiabilité du système	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Analyse du système par AdD, RB ➤ Mutation de AdD et FIP en RB par l'algorithme de conversion, ➤ Méthode de calcul thermique pour déterminer les paramètres de performance du four ➤ Identification des composants qui ont un impact sur l'indisponibilité du système.
[153]	Analyse de sécurité dans les installations de production : comparaison entre l'arbre de défaillance et le réseau bayésien.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Notions de base sur l'arbre de défaillances et les réseaux bayésiens ➤ Transformation de l'AdD en RB par l'algorithme de conversion ; ➤ Estimation de la probabilité d'occurrence de l'accident

		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Actualisation des croyances initiales sur l'accident à l'aide de nouvelles informations par le biais du réseau bayésien.
[154]	Réseau bayésien de croyances pour le diagnostic des défaillances du système	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Construction d'un arbre de défaillance pour montrer comment les défaillances des composants sont susceptibles de créer des écarts inattendus au niveau des variables surveillées par les capteurs. ➤ Conversion de AdD en RB ➤ Détermination Les probabilités a posteriori de défaillance des composants, servent à identifier les composants à l'origine des symptômes observés.
[142]	Analyse quantitative du risque des opérations de forage en mer : Une approche bayésienne	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Application de la méthode du nœud papillon et du réseau bayésien à l'analyse quantitative des risques liés aux opérations de forage. ➤ Comparaison entre la méthode du nœud papillon et la méthode du réseau bayésien en montrant comment l'utilisation des réseaux bayésiens facilite la mise à jour séquentielle des probabilités ainsi qu'une meilleure représentation des dépendances conditionnelles existant entre les événements. ➤ Identifier le scénario le plus susceptible d'être à l'origine de l'accident
[155]	Évaluation dynamique de la sécurité des stations de gaz naturel à l'aide de réseau bayésien	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pour l'analyse des dangers, la méthode AMDEC est employée, ainsi que des modèles de nœud papillon et de réseau bayésien pour modéliser le scénario d'accident le plus défavorable et évaluer les risques.

		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Selon cette étude, la défaillance du système de contrôle est le scénario d'accident ayant les conséquences les plus graves, avec le facteur d'erreur humaine le plus marqué.
[156]	Facteurs de causalité dans le processus d'urgence en cas d'incendie pour le stockage et le transport de pétrole et de gaz basé sur l'analyse de l'arbre des défaillances et le modèle de réseau bayésien modifié	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Une méthode d'analyse par Add et un modèle de RB sont adoptés afin d'analyser qualitativement et quantitativement les facteurs de cause. ➤ Détermination de manière plus précise l'influence quantitative de chaque facteur de risque,

V.3.2.1. Structure du réseau bayésien à partir de l'arbre des défaillances : conditions pour une mutation de l'Add au RB

Pour obtenir un RB à partir d'un Add [69,149], il convient de suivre les instructions de l'algorithme ci-dessous. On suppose que le Add n'a que des portes logiques « et », « ou » et « k-sur-n », et que le BN obtenu est binaire, les variables représentent les états des composants d'un système et les deux valeurs qu'elles puissent prendre sont indiquées par faux « F » lorsque le système fonctionne, par vrai « V » dans le cas d'un système défaillant. Cependant, l'algorithme peut être adapté à n'importe quel système Add



FigureV.5.Transformation depuis l'arbre des défaillances au réseau bayésien par l'algorithme de conversion

A propos de la partie qualitative du RB « transformation graphique »

- Tout événement de base « primaire » de l'AdD correspond à un nœud racine dans le RB.
 - Tout événement intermédiaire de l'AdD est converti en un nœud intermédiaire du BN.
 - Toute porte du AdD correspond à un nœud dans le RB, en particulier la porte dont la sortie est l'événement central « sommet » de l'AdD sera désignée comme nœud de défaillance.
 - Les nœuds du BN doivent être liés tout comme les portes du FT selon leur arrangement
- les figures V.6 et V.7 ci-dessous présentent le passage de la structure d'un AdD simple vers la structure du RB.

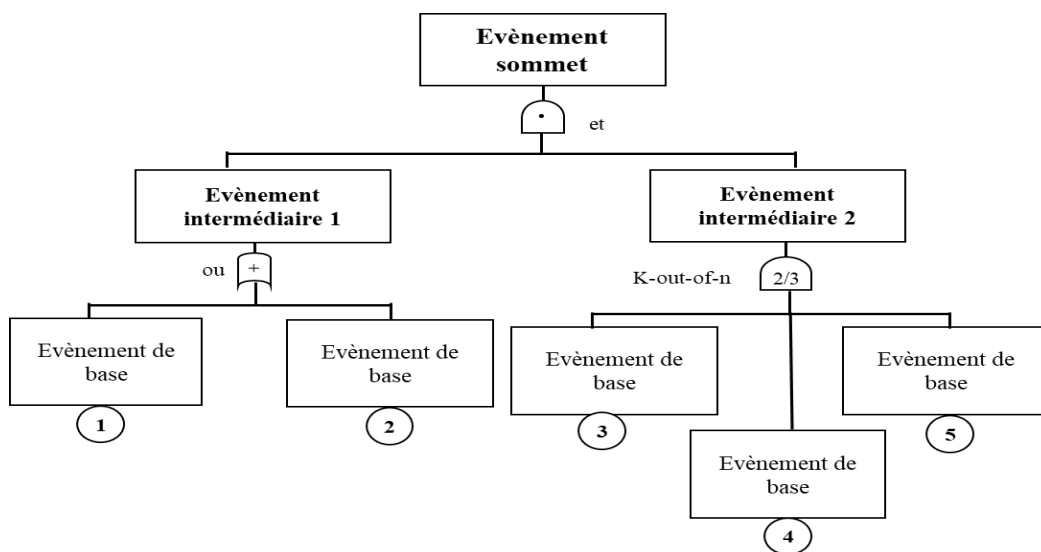


Figure V.6. Exemple de Structure d'un arbre de défaillance

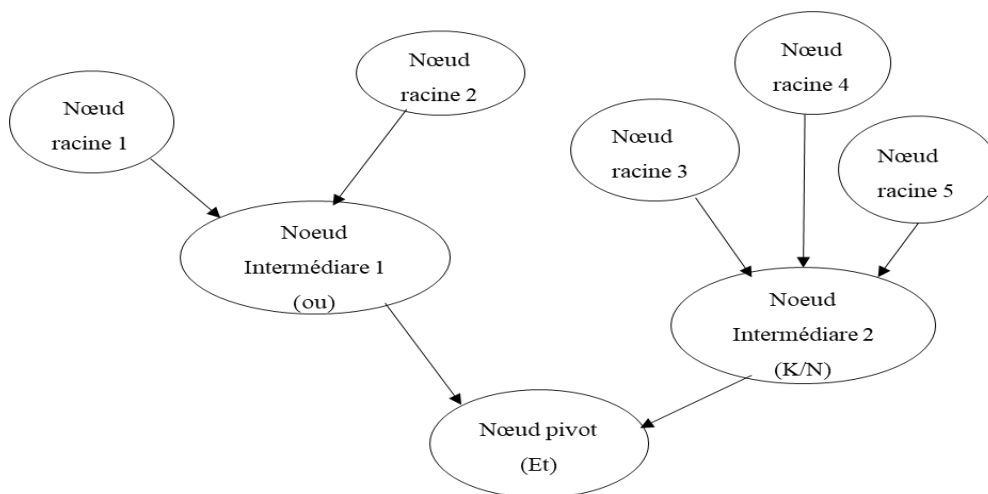


Figure V.7. Structure du réseau bayésien créée à partir de la Figure V.6

Chapitre V : Démarche bayésienne pour l'analyse des risques

A propos de la partie quantitative du RB « transformation numérique »

- Tout nœud racine du RB, la même probabilité a priori de l'événement de base correspondant dans l'AdD est affectée.
- Toute porte logique "Ou", "Et" et "K-out-of-N" reliant l'événement de base, l'événement intermédiaire et l'événement sommet dans l'AdD correspond à une table de probabilité conditionnelle équivalente dans le RB.

Pour les portes logiques « OU », « k-sur-n » et « ET », les tableaux V.2, V.3 et V.4 présentent respectivement les tables de probabilités conditionnelles.

Tableau V.2. Nœud intermédiaire 1 : TPC de la porte logique « OU »

Nœud racine 1	Nœud racine 2	P (Noeud Intermédiaire 1 [Or]=1)	P (Noeud Intermédiaire 1 [Or]=0)
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

Tableau V.3. Nœud intermédiaire 2 : TPC de la porte logique « K/N »

Nœud racine 3	Nœud racine 4	Nœud racine 5	P (Noeud Intermédiaire 2 [K/N]=1)	P (Noeud Intermédiaire 2 [K/N]=0)
0	0	0	0	1
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	0

Tableau V.4 Nœud Pivot : TPC de la porte logique « ET »

Noeud Intermédiaire 2 [K/N]	Noeud Intermédiaire 1 [Or]	P (Nœud pivot [ET]=1)	P (Nœud pivot [ET]=0)
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

V.3.2.2. Réseau bayésien issu à partir d'arbre de défaillance en présence des événements répétés

Lorsqu'un événement de base [154] est présent plus d'une fois dans l'AdD, on dit qu'il comporte des événements répétés. Les AdD avec des événements répétés peuvent être cartographiés en RB en construisant un seul nœud pour chaque événement de base et en connectant les nœuds qui correspondent aux événements répétés avec des arcs multiples. Dans

la figure 5.8, l'évènement de base **M** se manifeste deux fois en tant que sortie des portes G2 et G3.

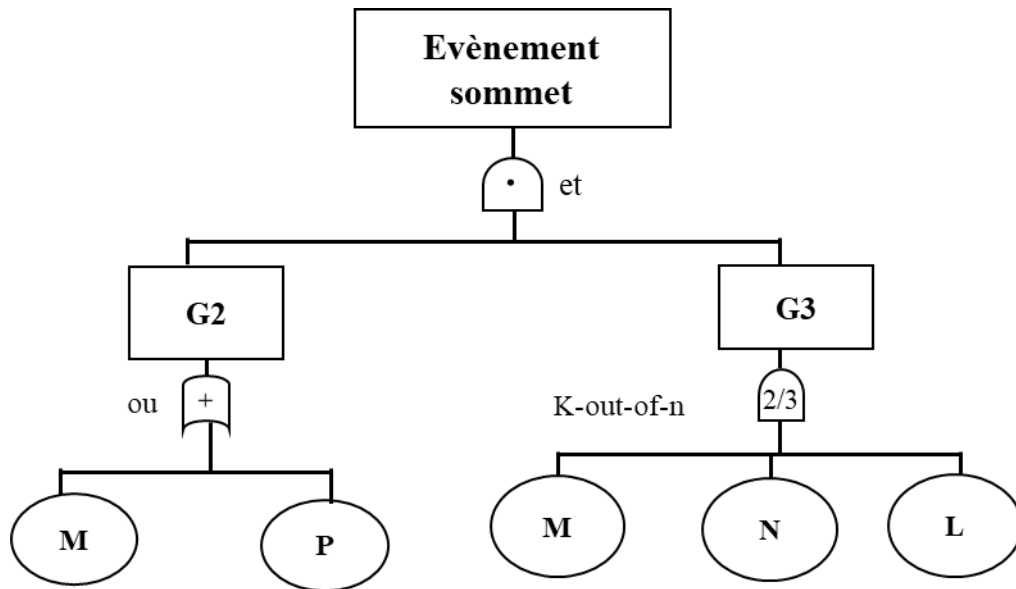


Figure V.8.Exemple de l'AdD en présence de l'évènement répété

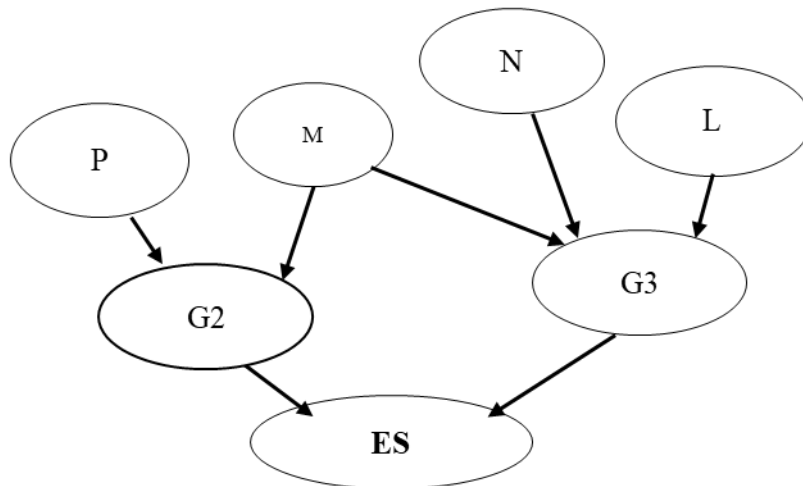


Figure V.9.Réseau bayésien en présence d'un noeud répété

La figure V.9 représente le RB correspondant à l'AdD de la figure V.8. Le nœud **M** figure une seule fois, lié à la fois aux nœuds G2 et G3.

Lorsqu'il y a de nombreux évènements répétés de l'AdD, le RB qui l'accompagne peut prendre une forme graphique dans laquelle les liens se croisent de manière à compliquer la compréhension visuelle du réseau. La même méthode peut être utilisée pour traiter un AdD dont les branches se répètent. Le RB correspondant donnera lieu à des nœuds avec des liens multiples, comme le montrent les figures V.10 et V.11.

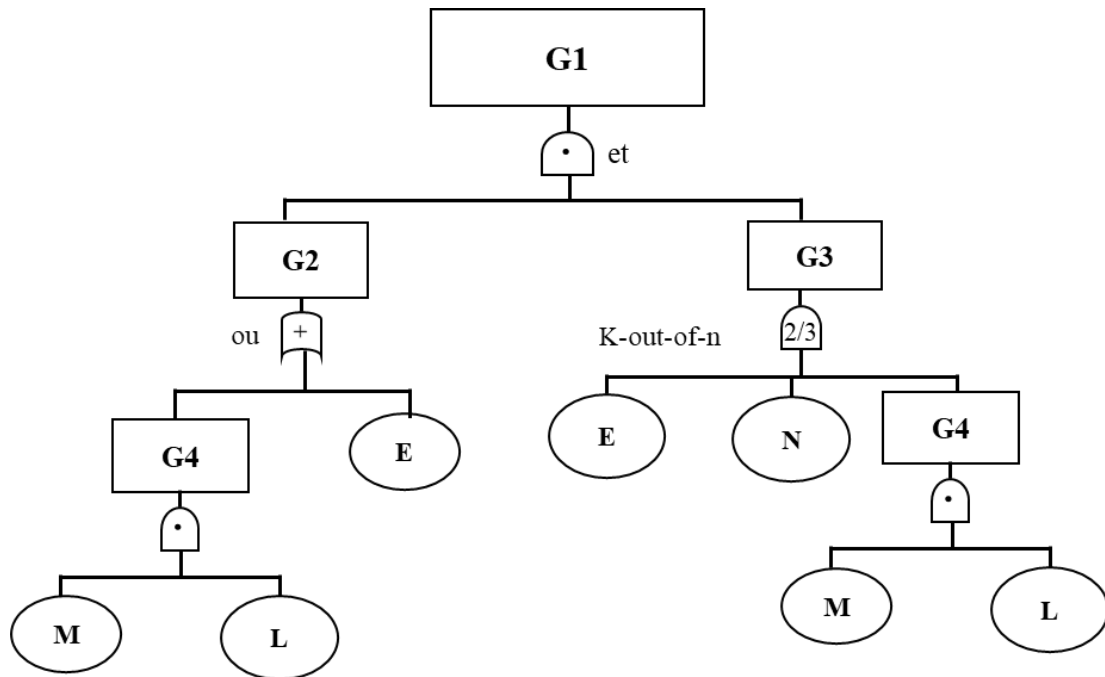


Figure V.10. Exemple de l'AdD avec une branche répétée

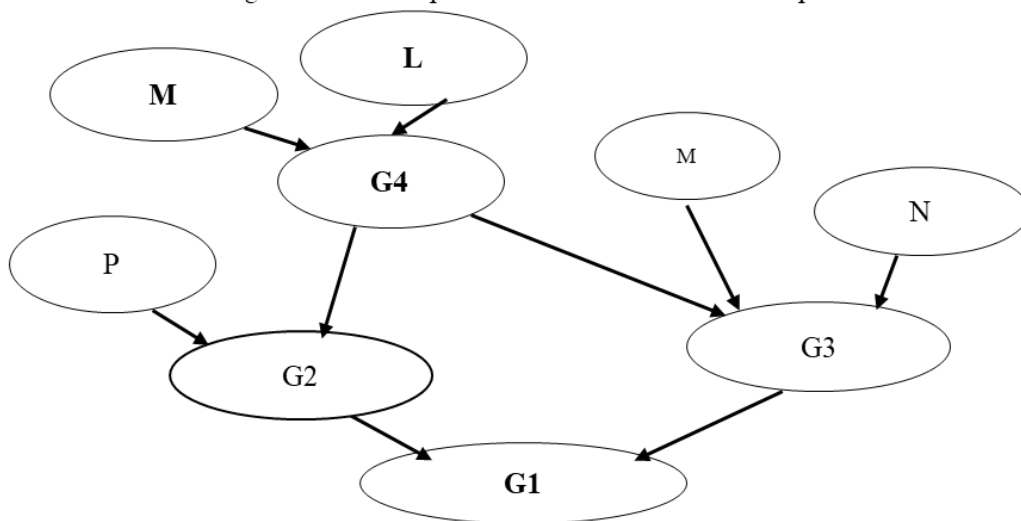


Figure V.11. Exemple de RB correspondant à l'AdD de la Figure V.10

V.3.2.3. L'inférence bayésienne générée par AdD

L'événement sommet dans l'AdD représente la probabilité à priori du nœud de défaillance dans le RB dans l'étude d'indisponibilité (la probabilité à postériori est acquise par l'inférence du réseau), et la même méthode est suivie pour les événements intermédiaires (sous-système). Les calculs d'indisponibilité dans un AdD sont effectués à partir des coupes minimales, tandis que dans le RB, ces calculs peuvent être effectués en utilisant le concept de l'inférence bayésienne.

Dans le contexte de l'inférence bayésienne des réseaux, le théorème de Bayes est une source d'information utile. Ce principe permet de créer une mise à jour des probabilités pour les nœuds du réseau en réponse à de nouvelles informations ou évidences. Selon le théorème de Bayes, la probabilité conditionnelle d'un événement H connaissant un événement E est donnée sous la forme suivante [69] :

$$P(H | e) = \frac{P(e|H) \times P(H)}{P(e)} \quad (V-6)$$

Où :

$P(H|e)$ est la probabilité à posteriori de H sachant E,

$P(e|H)$ est la probabilité de 'e' se réalise lorsque H est vrai,

$P(H)$ est la probabilité à priori de H,

$P(e)$ est la probabilité marginale de 'e'.

Lorsqu'une défaillance [69,141,154] est présentée comme une évidence, la probabilité postérieure de chaque composant fournit des informations sur la criticité de chaque composant, et la probabilité postérieure d'un sous-système fournit des informations sur la criticité du sous-système source de la défaillance du système.

Le théorème de Bayes sert, dans les réseaux bayésiens, à calculer les probabilités à posteriori des nœuds du réseau. En présence de nouvelles évidences dans le réseau, les probabilités des nœuds pertinents sont modifiées en conséquence. La prise en compte des informations supplémentaires permet au théorème de Bayes de produire une estimation plus précise des probabilités dans le réseau.

V.3.3. Facteur d'importance probabiliste en RB

Les facteurs d'importance probabilistes sont des mesures très efficaces pour évaluer le degré d'implication des composants dans l'impact de la défaillance du système. En attribuant une valeur numérique à chaque composant, il est possible de les classer en fonction de leur criticité par rapport à l'événement principal ou intermédiaire, ce qui peut aider à détecter les éléments potentiellement faibles du système. Ils peuvent être probabilistes ou déterministes, selon qu'ils incluent ou non la probabilité du composant.

Nous constatons, au vu du raisonnement de l'inférence sur les RB obtenus par AdD et des définitions des facteurs d'importance probabiliste en §2, que le facteur de Birnbaum se déduit à

partir de l'équation (IV-5). La probabilité à posteriori est basée sur l'inférence du RB. Et donc, le facteur d'importance probabiliste de Birnbaum (marginal) s'exprime comme suit :

$$I_{Y_i}^{Pr}(t) = P(T = 1 | Y_i = 1)(t) - P(T = 1 | Y_i = 0)(t) \quad (V-7)$$

Par conséquent, la formule du facteur d'importance probabiliste Critique est exprimée sous la forme suivante :

$$I_{Y_i}^{Cr}(t) = \frac{\left(P_{(T=1 | Y_i=1)}(t) - P_{(T=1 | Y_i=0)}(t) \right) \times P_{Y_i}(t)}{P_T(t)} \quad (V-8)$$

Avec :

$P_{(T=1 | Y_i=1)}(t)$ représente la probabilité à priori que le système T tombe en panne sachant que le composant Y_i est défaillant à l'instant " t "

$P_{(T=1 | Y_i=0)}(t)$ désigne la probabilité à postérieure que le système T est en panne si le composant Y_i est en service à l'instant ' t '.

$P_T(t)$ représente la probabilité du système T à l'instant ' t '

$P_{Y_i}(t)$ désigne la probabilité du composant Y_i à l'instant ' t '

V.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur les réseaux bayésiens et donné un aperçu général de l'application de la méthode bayésienne pour l'analyse quantitative des risques. Nous avons vu que le réseau bayésien est basé sur un formalisme dérivé de la théorie des graphes et des probabilités et qu'il permet de représenter un ensemble de variables aléatoires pour lesquelles un certain nombre de dépendances sont connues. Il a été fréquemment utilisé pour des recherches complémentaires du fait de son efficacité visuelle et conceptuelle dans la représentation des liens entre les défaillances et les pannes d'un système.

La démarche bayésienne se démarque très nettement par rapport à d'autres méthodes classiques citées précédemment dans le chapitre 4, du fait qu'elle permet de :

Acquérir des connaissances plus riches avec moins d'incertitude : la probabilité à postérieure reflète les nouvelles connaissances pour l'analyste.

Ces applications dans l'industrie, en raison du principe de réactualisation dynamique des connaissances, servent en particulier à la mise à jour des bases de données sur les défaillances.

Chapitre V : Démarche bayésienne pour l'analyse des risques

Les RB représentent un outil de modélisation efficace dans l'analyse de sûreté de fonctionnement car ils sont capables d'effectuer la même analyse que l'AdD. En particulier, nous avons vu comment une AdD peut être mise en correspondance avec un RB et comment cette technique peut fournir les mêmes informations comme la probabilité de défaillance du système, détermination des facteurs d'importance probabilistes de Birnbaum et critique.

De plus, la modélisation RB permet de calculer la probabilité postérieure des nœuds du réseau. Cela permet de mesurer la criticité du composant par rapport à une occurrence du nœud de défaillance (événement sommet). L'avantage de la probabilité à posteriori, donc, réside dans le fait qu'elle permet d'introduire des évidences pour plus d'une variable. Par exemple, dans une procédure de diagnostic de défaillance, lorsque le système est inspecté, des informations peuvent être introduites pour les composants qui s'avèrent être en état de marche. On obtient ainsi une probabilité actualisée pour n'importe quelle configuration du système. En outre, l'analyse au moyen des RB est immédiate, alors qu'avec AdD, chaque scénario est étudié en calculant d'abord les principales implications, puis la criticité des composants. La comparaison des deux techniques permet de conclure qu'elles fournissent une analyse similaire, mais que les RB pourraient apporter plus de solutions de modélisation dans des processus comme les diagnostics de défaillance, car ils sont capables de mettre à jour la probabilité lorsque des évidences sont introduites. De plus, les RB semblent donner une représentation plus concise, par exemple, dérivée de l'AdD avec des événements répétés. C'est pourquoi la recherche s'est orientée vers l'utilisation des RB dans les diagnostics de défaillance.

L'inférence dans les RB peut refléter les défaillances et les pannes qui ont été observées, et les probabilités à posteriori permettent de définir les causes éventuelles. Il est possible de réutiliser ces probabilités (à priori) en tant que probabilités de connaissance pour actualiser le réseau.

Nous allons proposer une étude de cas réelle dans le chapitre suivant pour démontrer la mise en œuvre pratique des réseaux bayésiens dans le contexte de la sécurité des systèmes. Nous passerons en revue les étapes de la modélisation par le biais d'un exemple choisi, ainsi que les résultats et les conclusions auxquels nous sommes parvenus. Cette étude de cas réelle démontrera l'efficacité et l'utilisation de la méthode des réseaux bayésiens pour faire face à des situations complexes en matière de sécurité des systèmes.

Chapitre VI

Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Sommaire du chapitre:

VI.1. Introduction.....	152
VI.2. Méthodologie proposée.....	153
VI.3. Présentation de l'unité de distillation sous vide.....	158
VI.3.1. Description de l'unité	158
VI.3.2. Description du four sous vide (21F1).....	158
VI.3.3. Potentiels de dangers liés aux produits.....	160
VI.3.4. Potentiels de dangers liés aux procédés : Conditions opératoires du four.....	160
VI.4. Analyse de la fiabilité du four : étude de cas à partir de scénarios d'incendie.....	161
VI.4.1. Problématique abordée	161
VI.4.1.1. Bilan du premier accident du four 21F1	161
VI.4.1.2. Bilan du deuxième accident du four 21F1	165
VI.4.1.3. Travaux de rénovation du four 21F1	168
VI.4.2. Scénarios et phénomènes dangereux liés au four 21F1	172
VI.4.2.1. Analyse par AMDEC et HAZOP du four 21F1	172
VI.4.2.2. Résultats retenus selon les méthodes HAZOP et AMDEC	222
VI.4.3. Données recueillies pour l'étude de fiabilité du four	224
VI.4.4. Elaboration de l'arbre de défaillance	226
VI.4.5. Étude par un réseau bayésien du scénario de l'incendie du four 21F1	231
VI.4.5.1. Structure du RB issu de l'ADD.....	231
VI.5. Application de la méthode de calcul thermique pour déterminer les paramètres de performance du four 21F1	232

VI.5.1. Détermination du rendement thermique du four 21F1	233
VI.5.1.1. Étude de cas du design.....	233
VI.5.1.2. Étude de cas réel (cas de défaillance).....	237
VI.5.1.3. Étude de cas réel (cas après rénovation).....	241
VI.5.2. Détermination de la quantité de chaleur absorbée par le fluide à réchauffer (BRA) du four 21F1	244
VI.5.3. Détermination du coefficient global de transfert de chaleur (h) du four 21F1	244
VI.5.3.1. Etude cas design	244
VI.5.4. Comparaison des résultats obtenus entre les trois cas	248
VI.5.5. Simulation de Monté Carlo.....	254
VI.6. Paramètres de performance du four 21F1 dans le RB.....	255
VI.6.1. Interprétation des résultats obtenus à partir des paramètres de performance intégrés dans le réseau bayésien.....	260
VI.6.2. Variation de l'indisponibilité des éléments identifiés en fonction du temps dans les trois études (design, défaillance et rénovation)	261
VI.6.3. Comparaison entre l'ADD et le RB	261
VI.7. Conclusion : Synthèse générale de l'étude de cas	262
Conclusion générale	266
Revue de la thèse	267
Perspectives	268

VI.1. Introduction

Dans l'industrie du pétrole et du gaz, les fours industriels constituent un outil essentiel, capable de supporter des pressions et des températures extrêmement élevées. Le suivi de ces équipements devient une charge importante pour les exploitants, étant donné que leur vieillissement au fil du temps risque de provoquer des accidents, y compris les incendies et les explosions.

Les fours industriels, surtout lorsqu'ils sont utilisés pour la production de produits finis destinés à la commercialisation, peuvent être le lieu de situations potentiellement désastreuses dans leur environnement thermique. La fabrication de produits tels que les huiles de base est une activité cruciale en Algérie, où le secteur pétrolier est l'un des fondements économiques du pays.

La sûreté du fonctionnement des fours industriels est un sujet qui préoccupe énormément les exploitants de raffineries. Cette étude de cas porte sur le four de distillation sous vide de la raffinerie d'ARZEW, unité de production des huiles de base. À cette fin, une méthodologie permettant d'évaluer la sûreté de fonctionnement du four à l'aide d'un calcul thermique a été mise en œuvre.

Dans ce cas, nous avons choisi de mettre en lumière une problématique particulière qui s'est posée lors de contrôles de l'unité. Nous avons pris les années 2010, 2011, et 2016 comme exemples du fait qu'il s'agit là des années qui fournissent le plus d'informations. Lors d'une inspection régulière de l'unité, des défauts ont été découverts sur le four, soulignant les risques potentiels d'incendie et d'explosion. Il a fallu procéder à une analyse approfondie des risques, à une évaluation de la performance du four pour la prévention des incendies, ainsi qu'à des mesures de rénovation visant à limiter ces risques, lesquelles ont été adoptées en 2017.

Il convient aussi de souligner que cette étude a pour but de comparer les résultats de trois cas différents : cas de design, cas de défaillance et cas de rénovation. Les objectifs de la comparaison étaient d'évaluer l'utilité liée à l'utilisation de paramètres de performance pour identifier les sources de défaillance et les éléments qui y contribuent, ainsi que la manière dont les mesures de modernisation améliorent les performances du four en matière de prévention des incendies.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Conformément à l'organigramme proposé dans la figure VI.1 dans le but principal d'effectuer une analyse de fiabilité du système et de déterminer la contribution de chaque composant à l'indisponibilité du système. Les résultats ainsi acquis par le calcul thermique des paramètres de performance seront utilisés comme données a priori pour le développement d'un modèle au moyen d'un réseau bayésien dans l'étape suivante.

VI.2. Méthodologie proposée

Pour étudier la fiabilité de l'équipement thermique qui fait l'objet de notre étude de cas, à savoir un four situé dans l'unité de distillation sous vide, nous avons proposé une méthodologie présentée dans la figure VI.1. L'objectif de l'étude est de voir si le four peut être remis dans des conditions de fonctionnement normales et s'il fonctionne proprement après la rénovation. L'idée de ce travail est répartie en deux sections : la première est consacrée à l'analyse de fiabilité du four dans le cas du design, tandis que la seconde est consacrée au calcul thermique dans le cas design et le cas réel : cas de défaillance et cas après rénovation.

La première section est intitulée "Analyse dynamique de la fiabilité du four dans le cas du design".

La méthode HAZOP est appliquée pour déterminer les risques pour chaque partie du four, en tenant compte de tous les paramètres tels que le débit, la température, la pression, qui jouent un rôle essentiel dans la sécurité du système. En complément, la méthode AMDEC est utilisée pour identifier les défaillances des composants du four.

Les résultats de l'HAZOP/AMDEC reflètent les "événements de base", autrement dit les phases fondamentales de l'analyse par l'arbre de défaillance. Cette méthode permet d'analyser un système de deux manières différentes :

- ✓ Qualitativement, il s'agit du développement de l'arbre et la détermination des coupes minimales.
- ✓ Quantitativement, la probabilité des événements de base, des événements élémentaires et de l'événement principal est déterminée en utilisant la base de données OREDA pour tirer le taux de défaillance de chaque événement de base avec les règles booléenne relatives à chaque porte logique définies précédemment dans les équations (IV-2) et (IV-3) du chapitre 4. En outre, les facteurs d'importance probabiliste (Birnbaum et Critical) sont calculés pour classer les éléments qui ont un impact direct sur l'événement central. Les éléments sélectionnés seront déterminés dans la deuxième section, qui se concentrera sur

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

le cas réel. Nous les fournirons sous la forme d'un tableau correspondant au cas du design, comme le montre le tableau VI.8, plutôt que d'énumérer tous les éléments.

Ensuite, le réseau bayésien est utilisé comme un outil complémentaire de l'ADD pour la prise de décision. Dans cette étape, la structure de l'ADD est transformée en réseau bayésien afin de créer le modèle dans le cas du design, tout en calculant les facteurs d'importance probabiliste (Birnbaum et Critical) comme décrit dans la section FIPs en réseau bayésien du chapitre 5. Cette démarche a permis de générer l'idée d'une comparaison entre l'ADD et le RB dans le cas du design.

La deuxième section est intitulée "Méthode de calcul thermique du four".

La méthode de calcul thermique est appliquée pour déterminer les paramètres de performance du four : rendement thermique (η), quantité de chaleur absorbée (Q) et coefficient global du transfert de chaleur (h), décrivant l'état de l'équipement dans les trois cas étudiés : design, défaillance, et après rénovation. Conformément aux explications apportées au chapitre 1 :

- ✓ Rendement thermique (η) est un indicateur essentiel, il est destiné à fournir une idée globale sur la performance de l'équipement.
- ✓ Quantité de chaleur absorbée (Q) : ce facteur indique la quantité de chaleur absorbée par le fluide. Si cette valeur est trop faible, la perte de chaleur sera importante, ce qui limitera les performances du four. D'autres facteurs contribuant à la perte de chaleur peuvent entraîner des risques de perte de confinement au niveau du four, susceptible de provoquer une fuite de charge qui pourrait être suivie d'un incendie.
- ✓ Coefficient global du transfert de chaleur (h) : l'indicateur révèle la présence d'une couche de coke à l'intérieur des tubes, réduisant ainsi le transfert de chaleur entre le fluide et la surface interne des tubes.

En utilisant les Données opératoires, ces trois paramètres sont calculés pour chaque cas étudié. L'objectif de cette étape était d'évaluer et de comparer les résultats pour chaque cas ainsi que d'expliquer de manière détaillée le problème à l'origine de la défaillance du four. Cette phase fait référence à l'étape 2 de la figure VI.1.

Pour convertir les valeurs obtenues de paramètres de performance en valeurs de probabilité pour les cas de défaillance et après rénovation, une simulation de Monte Carlo avec une distribution uniforme est appliquée.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Ensuite chaque paramètre de performance sera introduit sous forme de probabilités en RB du cas du design présenté dans la première section afin d'étudier le système dans ses états de défaillance et de rénovation. Cette partie se réfère à l'étape 1 de la figure VI.1.

Pour hiérarchiser les éléments qui ont un impact direct sur la défaillance du four dans le cas réel, la probabilité de chaque composant est déterminée, ainsi que les facteurs probabilistes importants (Birnbaum et Critical).

Etant donné que les valeurs de probabilité obtenues par RB sont les mêmes que celles obtenues par l'ADD, les valeurs FIPs pour les cas de défaillance et après rénovation sont déterminées par ADD. Cela a donné naissance à une comparaison significative entre l'ADD et le RB. Cette partie se réfère à l'étape 3 de la figure VI.1.

Une fois les éléments de base retenus, un contrôle rigoureux a été mis en œuvre pendant que l'équipement était hors service pour inspection afin de mieux comprendre le comportement de ces éléments et l'indisponibilité de chaque composant en fonction du temps pour les trois cas étudiés : cas du design, cas de défaillance et cas après rénovation.

Sur la base des informations recueillies, une conclusion est tirée pour donner une idée de l'étude proposée concernant l'analyse de la fiabilité du système étudié après la comparaison des trois cas.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

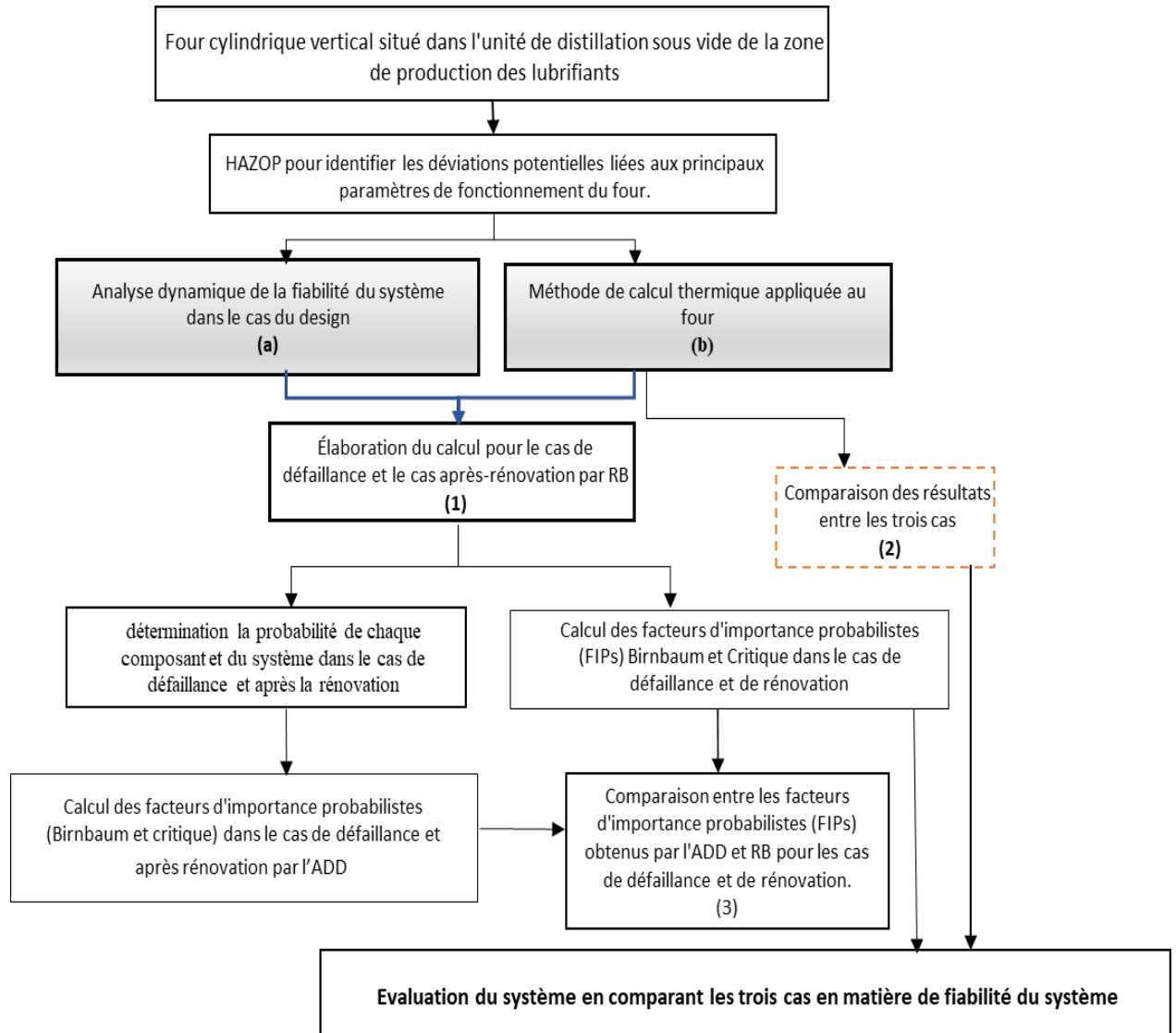


Figure VI.1. Organigramme de la méthodologie proposée pour l'étude d'un scénario d'incendie dans un four, avec une extension pour chaque section (a) et (b).

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

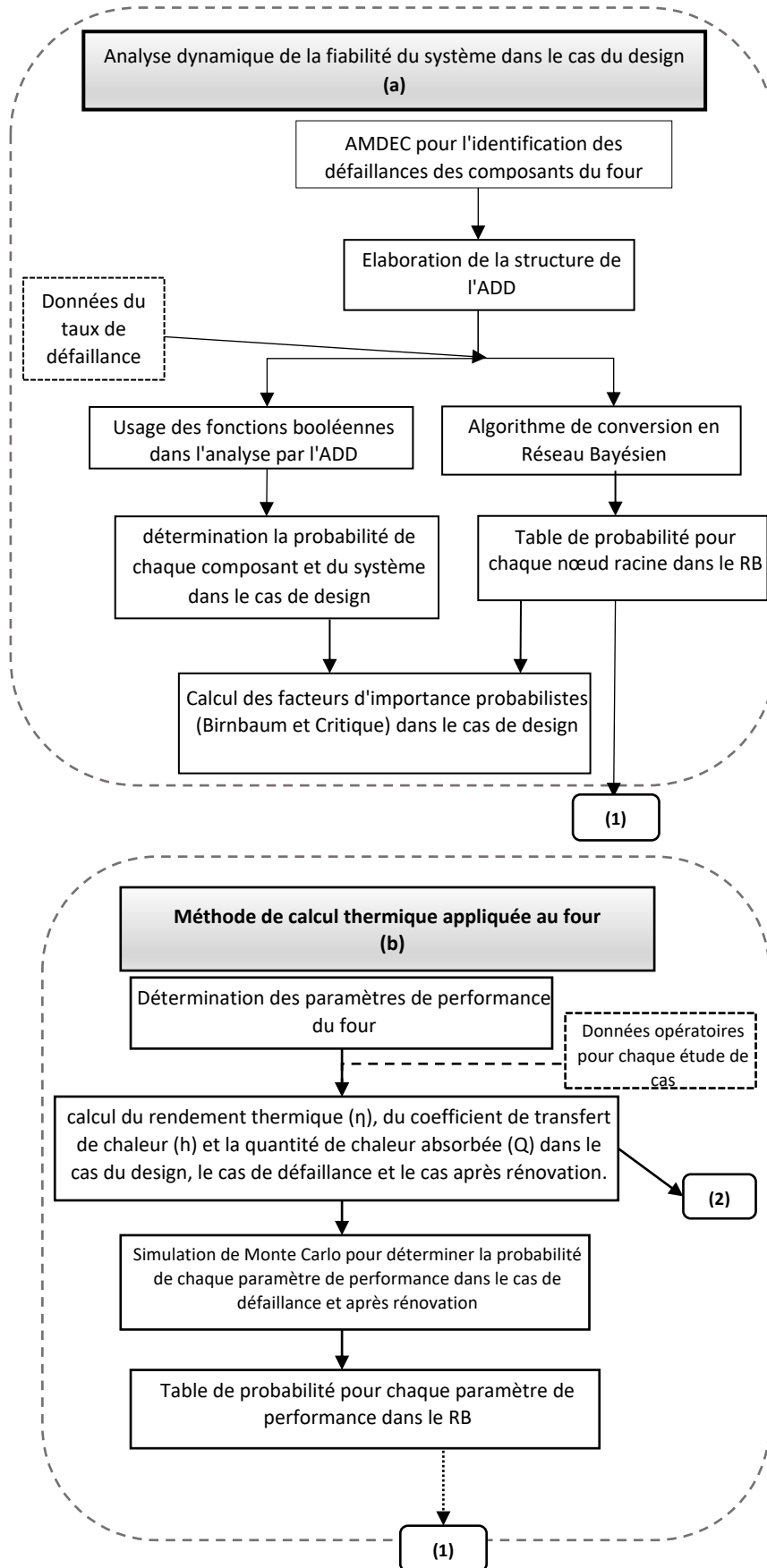


Figure VI.1. Suite : extension pour chaque section (a) et (b)

VI.3. Présentation de l'unité de distillation sous vide

VI.3.1. Description de l'unité

L'unité de Distillation Sous Vide (DSV) a pour but de préparer, à partir de Brut réduit atmosphérique « BRA » provenant de l'unité de distillation atmosphérique, des distillats qui seront transformés en huile de base. la charge d'alimentation BRA est préchauffée jusqu'à une température de 283°C dans une batterie d'échangeurs par récupération de chaleur sur les produits et les reflux circulants, elle est ainsi portée à la bonne température pour être envoyé dans le four 21-F1 où elle va être chauffé et partiellement vaporisé, permettant ainsi d'atteindre la température requise 388°C pour la distillation. Le débit d'entrée du BRA dans le four est réparti en deux passes à l'entrée du four, favorisant le contact du BRA avec la chaleur. La vapeur de vélocité est également injectée avec le BRA à l'entrée du four afin d'augmenter la vitesse de ce dernier.

Le BRA est alors dirigé vers une colonne de distillation sous vide. En tête de la colonne de distillation sont récupérés, du gazole sous vide, trois distillats (MVO, VO et SPO), qui sont raffinés pour former la matière première pour la fabrication des huiles. Enfin, au fond de la colonne, un résidu sous vide est récupéré qui est envoyé, après rectification à la vapeur, vers le stockage pour les opérations ultérieures.

VI.3.2. Description du four sous vide (21F1)

Le four 21F1 est un équipement cylindrique verticale à radiation, convection et tirage naturel, équipé d'un cône de rerayonnement à la base de la cheminée ou de la zone de convection. qui agit comme une surface de rayonnement supplémentaire pour transférer la chaleur de la flamme vers les parois du four et le fluide de processus, permettant une distribution plus uniforme de la chaleur à l'intérieur du four.

Les serpentins seront disposés pour permettre des passes multiples. Chacune de ces passes doit avoir un nombre et une disposition identiques de tubes symétriques, lesquels sont constitués de 64 tubes de diamètres différents. Les tubes et accessoires du serpentins sont fabriqués en acier allié 2,25Cr-1/2Mo et en acier allié C-1/2Mo.

Dans ce type de four, la zone de convection est souvent réalisée par manchon circulaire créant un espace annulaire où les fumées circulent à la vitesse élevées, les tubes sont munis d'ailettes qui permettent d'obtenir un coefficient de film important, cotés fumées. Souvent ce sont les mêmes qui forment la zone de convection et la zone de radiation où le fluide de

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

procédé parcourt successivement dans ces deux zones. Le tableau VI.1 ci-dessous présente les caractéristiques générales du four.

Tableau VI.1. Caractéristiques générales du four sous-vide 21F

Nom	Four sous vide					
Type	Cylindrique vertical					
Zones du four	Zone de radiation					
	Zone de convection					
Hauteur (m)	Radiation		8.664			
	Convection		5.45			
Diamètre (m)	4.6					
Brûleurs	Nombre		4			
	Type		À l'air induit			
Cheminée	Tirage naturel					
Tubes	Matériaux		Acier allié (2,25Cr-0.5Mo) et acier allié (C-1/2Mo)			
	Type de fluide		Vapeur	BRA		
	Nombre de passes		1	2		
	Nombre de tubes		4	26	2	2
	Diamètre (pouce)		3.5	4	6	8
	Hauteur (m)		10.16	14.114		
Débit (Nm ³ /h)	54					
Pression (bar)	12					
Température d'entrée (°C)	283					
Température sortie (°C)	388					
Température de peau « tube » (°C)	550 max					
Température de fumées (°C)	440					

VI.3.3. Potentiels de dangers liés aux produits

Le résidu atmosphérique peut être inflammable en raison d'une température supérieure à son point d'éclair.

Le gaz combustible qui alimente le four de cette unité est très inflammable. Les propriétés physico-chimiques des produits de l'unité en termes d'inflammabilité se présentent comme suit dans le tableau VI.2 :

Tableau VI.2. Propriétés physico-chimiques des produits du four

Nom de produit	Utilisation	Inflammabilité			Température Maximale atteinte dans l'unité	Conclusion
		Point éclair	Température d'auto inflammation	Point d'ébullition		
Brut Réduit atmosphérique (BRA)	Matière première de la distillation sous vide, produit de la distillation atmosphérique.	140°C	DI	DI	393°C (sortie du four 21-F1)	Inflammable
Fuel gaz	Produit alimentant le four	-187°C	595°C	-161°C	40°C	Très Inflammable

DI : Donnée inexistante

VI.3.4. Potentiels de dangers liés aux procédés : Conditions opératoires du four

Le choix des conditions de température et de pression est déterminé afin d'assurer la bonne réalisation du procédé de fabrication et de limiter les besoins en énergie. Cependant, le traitement opéré dans le four de l'unité nécessite des températures et des pressions élevées pour obtenir des produits de qualité souhaitée dans la prochaine étape.

Il est donc possible d'observer quatre cas d'incidents sur l'équipement :

- Une inflammation du produit en cas de perte de confinement de l'équipement,
- Un éclatement de l'équipement en cas d'augmentation de la pression,
- Une explosion du four en cas d'accumulation de gaz et de création d'une atmosphère explosive.

VI.4. Analyse de la fiabilité du four : étude de cas à partir de scénarios d'incendie

VI.4.1. Problématique abordée

Le contrôle effectué sur cet équipement stratégique avait pour but d'accroître la durabilité et la sécurité de ce four, sachant que depuis 1977, le service d'inspection a détecté plusieurs causes probables susceptibles d'entraîner des pannes dans le four. Des informations plus détaillées sur l'historique de l'inspection du four figurent dans l'annexe A.

VI.4.1.1. Bilan du premier accident du four 21F1

Un suivi des TIS (Indicateur de Température de Sécurité de la paroi du "tube") N°5 et N°6 que nous avons pris comme exemple démonstratif pour expliquer la problématique, étant situés sur la paroi des tubes de diamètre 8" de sortie des deux passes, nous avons pris les périodes 2010, 2011 et 2016 pour lesquelles nous avons récolté le maximum d'informations.

Tableau VI.3. Récapitulatif du TIS du four 21F1 avant l'accident

Date	TIS5 (1 ^{ière} passe)	TIS6 (2 ^{ième} passe)	Design	Observation
Jan 2010	556°	547°	550°	TIS5 dépasse la température du design
Fév 2010	558°	549°	550°	TIS5 dépasse la température du design
Mar 2010	555°	547°	550°	TIS5 dépasse la température du design
Avr 2010	554°	545°	550°	TIS5 dépasse la température du design
Mai 2010	AA	AA	550°	Arrêt annuel
Juin 2010	560°	551°	550°	TIS5 et TIS6 dépasse la température du design
Juill 2010	555°	548°	550°	TIS5 dépasse la température du design
Août 2010	557°	547°	550°	TIS5 dépasse la température du design
Sépt 2010	559°	548°	550°	TIS5 dépasse la température du design
Oct 2010	550°	538°	550°	TIS5 dépasse la température du design
Nov 2010	549°	535°	550°	--
Déc 2010	549°	536°	550°	--

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.4. Récapitulatif du TIS du four 21F1 après l'accident

Date	TIS5 (1 ^{ère} passe)	TIS6 (2 ^{ème} passe)	Design	Observation
Jan 2011	540°	545°	550°	--
Fév 2011	A. accidentel	A. accidentel	550°	A. accidentel
Mar 2011	510°	522°	550°	--
Avr 2011	509°	520°	550°	--
Mai 2011	512°	525°	550°	--
Juin 2011	520°	531°	550°	--
Juill 2011	522°	335°	550°	--
Aout 2011	530°	545°	550°	--
Sépt 2011	525°	538°	550°	--
Oct 2011	525°	539°	550°	--
Nov 2011	522°	534°	550°	--
Déc 2011	531°	540°	550°	--

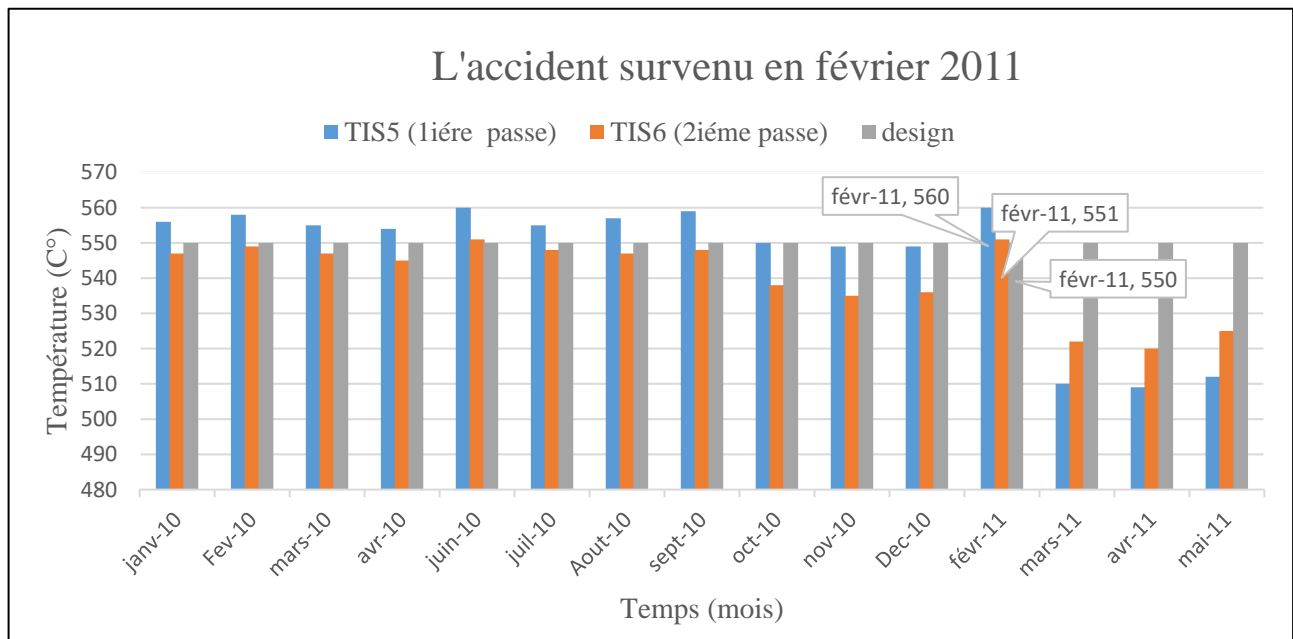


Figure VI.2. Variation de la température des tubes des deux passes jusqu'à l'accident survenu en février 2011

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Les tableaux VI.3 et VI.4 et la figure VI.2 ci-dessus nous montrent la fluctuation des températures de peau du TIS 5 de la première passe et du TIS 6 de la deuxième passe au cours des années 2010 et 2011, Le rapport d'accident du four 21 F1 a révélé suite aux constatations d'un dégagement de fumée dense de la cheminée du four en date du 04/02/2011, l'équipement a été mis hors de service pour inspection et diagnostique.

Après l'ouverture du trou d'homme du four, il a été observé ce qui suit :

Au niveau du foyer :

- ✓ Présence de produit noir sur le guide de gaine du tube n°17 (Figure VI.3).
- ✓ Présence de fumée sur les parois intérieures du four.



Figure VI.3. Présence de produit noir sur les guides de gaines du tube N°17

Au niveau des serpentins :

Passe N°01 :

- ✓ Présence d'une fissure dans la partie supérieure du tube N°17 d'une longueur de 200mm (figure VI.4 et figure VI.5).
- ✓ Déformation importante au niveau de la zone de convection des tubes n° 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 et 18. (figure VI.6).
- ✓ Présence d'écaillage important sur l'ensemble des tubes.
- ✓ Forte dégradation par oxydation des ailettes des tubes.

Après découpage des tubes endommagés, il a été constaté la présence d'une couche importante de coke sur les surfaces internes des tubes (Figure VI.7) et qui varie de 15 à 20 mm au niveau de la zone de convection et de 3 à 6 mm au niveau des extrémités supérieures et inférieures.

Passe N° 02 :

- ✓ Présence d'un écaillage important sur l'ensemble des tubes.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

- ✓ Forte dégradation par oxydation des ailettes des tubes.
- ✓ Le contrôle par radiographie gamma sur la face des tubes de convection, a permis de déceler la présence d'une couche de coke d'une épaisseur qui varie entre 10 et 15 mm au niveau de la zone de convection.



Figure VI.4. Fuite de la charge dans le tube numéro 17.



Figure VI.5. Présence d'une fissure dans la partie supérieure du tube N°17 d'une longueur de 200mm

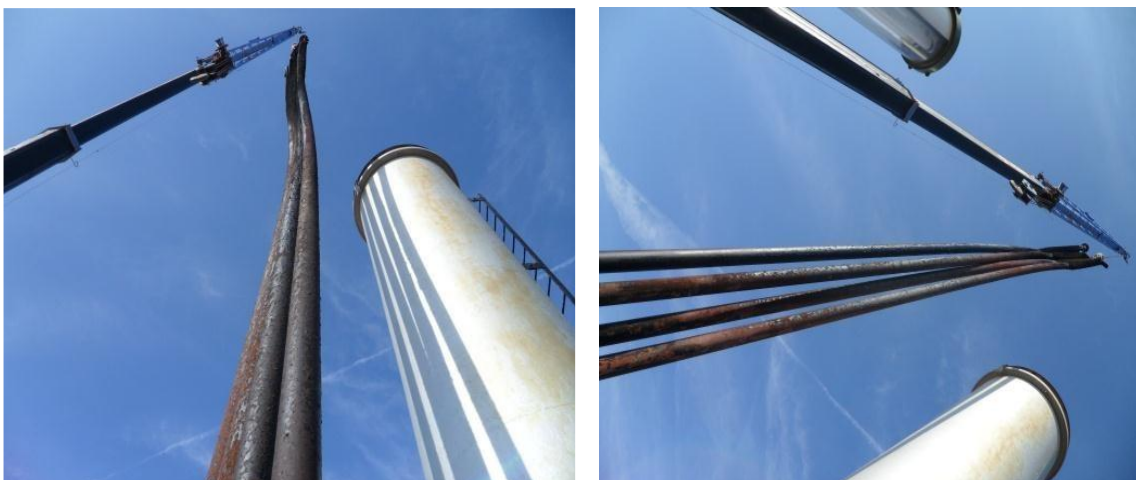


Figure VI.6. Déformation des tubes N°11,12, 13, 14, 15, 16, 17, 18



Figure VI.7. Présence d'une couche de coke sur les parois internes des tubes qui varie entre 15 et 20mm

Mesure corrective et recommandations :

Après diagnostic, il a été décidé de changer les tubes N°11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 et 18 de la passe N°01 qui étaient fortement déformés (Figure VI.6).

Les tubes du four présentent un vieillissement du métal, dû à une longue exposition des parois des tubes à des températures élevées, accentué par un mauvais transfert de chaleur dû à la présence d'une couche de coke assez importante. A cet effet, le four doit être exploité dans des conditions très rationnelles et à ne pas dépasser le taux de charge de 75% afin d'éviter toute complication supplémentaire.

En raison de l'indisponibilité des tubes, la réparation du serpentin a été limitée à la partie fortement dégradée de la première passe. Cependant, le serpentin du four est dans un état général qui nécessite un changement complet dès que possible.

VI.4.1.2. Bilan du deuxième accident du four 21F1

Incendie du four, une fumée dense a été observée au niveau de la cheminée du four 21F1, en date du 25/12/2016, après l'intervention, l'équipement est mis hors service pour le contrôle, inspection et diagnostic de la situation. Les constats préliminaires suite à l'ouverture du trou d'homme, les informations recueillies étaient les suivantes :

Au niveau du foyer :

- ✓ Présence de produit noir sur les gaines des tubes N° 16,17 et 18.
- ✓ Présence de fumée noire sur les parois internes du foyer.
- ✓ Dégradation de la sole par la chute de produit noir.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Au niveau des serpentins :

Passé N°2

- ✓ Présence d'un nid d'hydrocarbures sur la fissure du tube N°18 de la passe N°2 sur la partie convection du four (Figure VI.8).
- ✓ Lors de l'enlèvement de ce nid d'hydrocarbures, la fissure s'est propagée directionnellement d'environ 4m du haut vers le bas (Figure VI.9).
- ✓ Déformation importante des tubes N°15, 16, 17 et 18.
- ✓ Forte dégradation par oxydation sous l'effet de haute température des ailettes des tubes (Figure VI.10).
- ✓ Présence d'une couche d'oxydation importante sur les parois des tous les tubes du serpentin (Figure VI.11).



Figure VI.8. Nid d'hydrocarbures sur le tube N°18

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique



Figure VI.9. Fissure directionnelle du tube N°18 du serpentin N°2



Figure VI.10. Forte dégradation par oxydation sous l'effet de haute température des ailettes des tubes



Figure VI.11. Oxydation des tubes du serpentin N°2

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Passe N°1

- ✓ En date du 04/02/2011, il a été procédé au changement des tubes N°11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 et 18 suivant le rapport d'inspection. Ces tubes nouvellement installés ne présentent aucune déformation.
- ✓ Les tubes 1 au 10 et 19 au 30 présentent une forte oxydation par une haute température.

Mesure corrective et recommandations :

Un diagnostic a été effectué sur l'état des tubes et il a été jugé nécessaire de changer les tubes N°15, 16, 17 et 18 de la passe N°2 qui ont subi de fortes déformations et présentent également un fluage dû à la température élevée. En raison d'une exposition prolongée à des températures hautes et d'un mauvais transfert de chaleur dû à la présence d'une épaisse couche de coke à l'intérieur des tubes, les tubes du four présentent actuellement un vieillissement du métal.

À cet effet, le four doit être exploité dans des conditions extrêmement rationnelles, sans dépasser un taux de charge de 70 % pour éviter toute complication supplémentaire (Voir l'annexe A, Tableau A.2).

La réparation du serpentin a été restreinte à la partie fortement dégradée de la 2^{ème} passe, et ceci par l'indisponibilité des tubes. Cependant les deux serpentins du four présentent un état général défectueux nécessitant le changement total dans des courts délais.

VI.4.1.3. Travaux de rénovation du four 21F1

La société SOMIZ a été mandatée pour réaliser ces travaux conformément à la réglementation en vigueur relative aux équipements sous pression de gaz en vue de rénover les tubes des serpentins de chauffe des deux passes N°1 et 2 du four 21 F1.

Travaux de démontage

- ✓ Instrumentation : démontage de tous les accessoires et instrumentations du four.
- ✓ Brûleurs : démontage et dépose des 04 brûleurs.
- ✓ Cheminée et voute : démontage et dépose de la cheminée et la voute en une seule pièce.
- ✓ Plateforme supérieure (supportant le cône) : démontage et dépose des portions amovibles de la plateforme supérieure (12 portions).

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

- ✓ Cône de re-rayonnement : le cône a été extrait du four avec la charpente de la plateforme supérieure et par la suite déposé sur une structure métallique conçue pour soutenir ce dernier afin de conserver sa forme et éviter sa déformation.
- ✓ Serpentin du four :
 - Découpage et extraction des tubes du four par paquets de 10 tubes afin de faciliter leurs extractions.
 - Les tubes 6 et 8 pouces ont été extraits un par un après découpage de leurs brides inférieures et démontage des coudes supérieurs.

Travaux de réparation du réfractaire

- ✓ Réfection du mur réfractaire.
- ✓ Changement total de béton réfractaire des portes amovibles de la voute.
- ✓ Réfection du réfractaire de la sole.
- ✓ Réparation du réfractaire sur les parties endommagées de la voute et cheminée

Travaux de remontage

- ✓ Remontage un nouveau dumper.
- ✓ Remontage des serpentins de charge des deux passes.
- ✓ Remontage et mise en place du casing avec le cône de ré-rayonnement.
- ✓ Remontage et mise en place des boîtes amovibles.
- ✓ Remontage et mise en place de la cheminée.
- ✓ Changement des piquages des PI entrée et sortie de charge.
- ✓ Réfection et remise du béton réfractaire de la partie du casing inférieur du côté 6 et 8 pouces.
- ✓ Remontage et mise en place des brûleurs.
- ✓ Remontage les accessoires d'instrumentations.
- ✓ Soudure des TIS 5 et 6 sur les tubes N°30 diamètres 8 pouce des deux passes.
- ✓ Fermeture du TH
- ✓ Repérage de la position initiale des tubes.

Tests d'épreuve

- ✓ Visite réglementaire interne et externe du four par l'organisme de contrôle ENACT.
- ✓ Des essais hydrostatiques ont été réalisés sur les deux serpentins de charge conformément au règlement dérogatoire du ministère de l'industrie et des mines.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique



Figure VI.12. Ancien serpentín

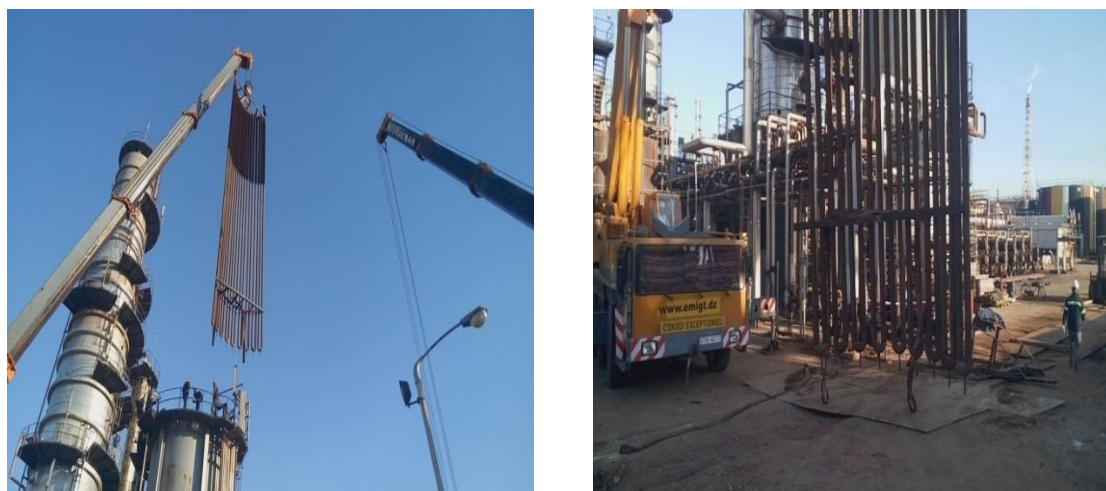


Figure VI.13. Travaux de rénovation

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique



Figure VI.14. Rénovation du four 21F1.

VI.4.2. Scénarios et phénomènes dangereux liés au four 21F1

Nous avons choisi de mettre en œuvre deux études, HAZOP et AMDEC, pour répondre à notre problématique. Ces deux méthodes ont pour but d'identifier tous les dangers susceptibles d'affecter le four de l'unité, en tenant compte de leurs conditions de fonctionnement, ainsi que les dangers générés par les équipements thermiques, c'est-à-dire les facteurs qui ne sont que rarement susceptibles d'affecter le four de l'unité, mais qui restent néanmoins un facteur de risque non négligeable pour l'équipement thermique. En outre, une présentation des travaux de rénovation du four 21F1 et de leur intégration dans l'AMDEC, mettant en évidence les mesures préventives et les actions correctives associées aux deux méthodes. La figure VI.15 présente un schéma descriptif de la distillation sous vide et l'emplacement du four 21F1 dans l'unité.

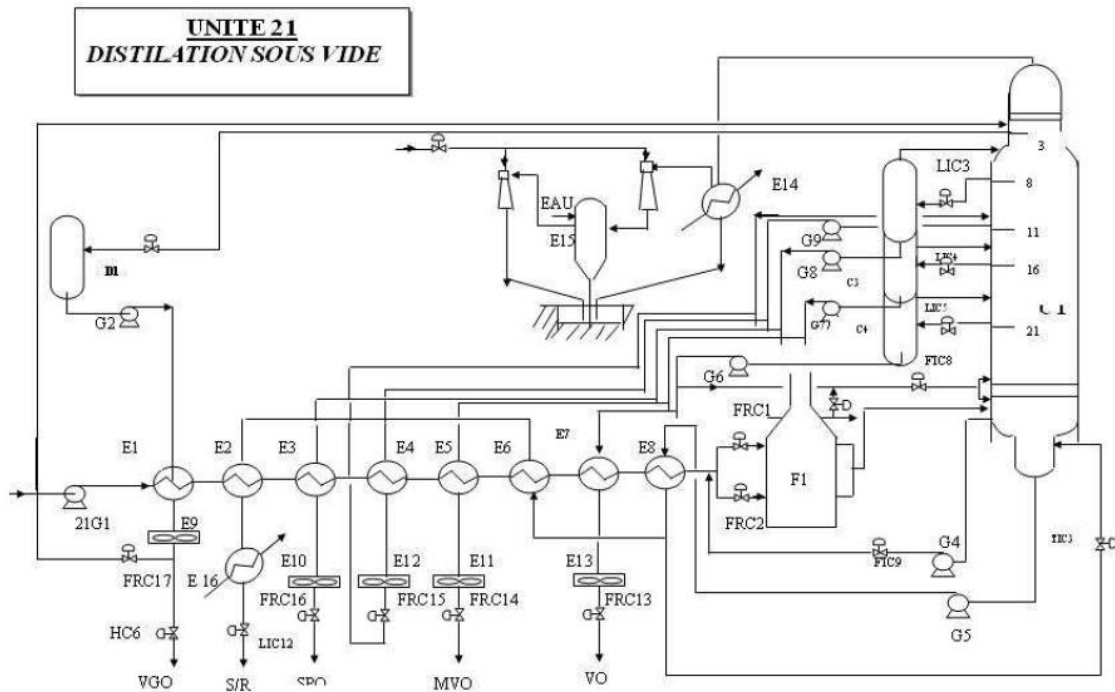


Figure VI.15. Représentation du procédé de distillation sous vide de l'unité 21

VI.4.2.1. Analyse par AMDEC et HAZOP du four 21F1

Tableau IV.5. Feuille de programmation de l'AMDEC

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
Les serpentins (tubes) de la charge BRA	Circulation du produit dans les deux passes du four. Transmettre la chaleur du combustible du four au produit à réchauffer	L'obstruction ou le colmatage des tubes (l'encrassement)	Conditions de service (température, pression, débit) inadaptées voire trop sévères.	Diminution de la productivité et de la qualité du produit obtenu au cours des phases ultérieures.	3	4	12	Maintenance préventive, le remplacement en temps voulu des pièces critiques et ainsi que le recours à des matériaux résistants à la corrosion peuvent contribuer à éviter les défaillances susceptibles de se produire et les dangers qui les accompagnent.	2	2	4
		Déformation et l'écaillage sur les parois externes des tubes	Défauts de conception ou de fabrication, Notamment des soudures mal effectuées, des matériaux de qualité médiocre	Des temps d'arrêt imprévus pour les réparations et des frais de maintenance plus élevés.							
		Fuite de la charge : éclatement des tubes	Usure liée à un usage prolongé	Perte de confinement du BRA dans le four 21-F1 : départ de feu dans le four.							
		la corrosion due à l'exposition à des températures élevées ou à des produits chimiques	Oxydation liée aux températures élevées et à l'interaction chimique entre le produit et la surface interne des tubes.	Dans les cas plus graves : explosion UVCE, feu de nappe, feu de jet							
		Rupture du tube sous l'effet de contraintes mécaniques									

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
								<p>Matériau et/ou traitement particulier</p> <p>Évitant tout problème de corrosion interne ou externe</p> <p>Contrôle des épaisseurs des tubes, test de dureté et répliques métallographiques.</p> <p>Ronde opérateur : Aperçu de fumées sortant du four</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : alarme en cas de haute</p>			

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
								<p>Température de peau (niveau haut et très haut)</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Arrêt four en cas de niveau très haut de la température en sortie four (440°C)</p> <p>Les deux passes du serpentin de charge ont été totalement rénovés</p>			

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
Conduite du combustible	Amener le combustible depuis le réservoir de stockage vers le brûleur du four	Fuite de combustible : Défaillance joint d'étanchéité	Dégradation ou défaillance de la tuyauterie ou les joints de la conduite	Diminution de la performance du four. Même un arrêt complet de la production.	3	4	12	Procédure de maintenance préventive	2	3	6
		Colmatage de la canalisation						Pour éviter les blocages ou les dysfonctionnements, il est essentiel de veiller à ce que les vannes de débit fonctionnent correctement il est conseillé d'effectuer des tests de pression réguliers pour s'assurer que les conduites peuvent supporter la pression la plus élevée.			
		Endommagement de la structure de support de la conduite	Erreurs de manipulation comme un mauvais réglage ou usage inapproprié	Accumulation de gaz combustibles dans la chambre de combustion							
		En cas de vanne partiellement ouverte, la pression augmente dans la conduite, ce qui peut entraîner des fuites ou des ruptures.	L'usure et Phénomène de corrosion	Perte de confinement de Fuel gaz							
		Vanne bloqué ouvert peut provoquer une alimentation excessive en combustible	Pression excessive dans la conduite en raison d'un mauvais réglage de la vanne	Risque d'incendie et explosion : feu de jet et UVCE				Ronde opérateur : odeur du gaz			
								Matériau et/ou traitement particulier évitant tout problème de corrosion interne ou externe de la conduite			
								Ronde opérateur : Aperçu de fumées sortant du four			

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
								<p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : alarme en cas de haute température de peau (niveau haut et très haut)</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Arrêt four en cas de niveau très haut de la température en sortie four (440°C)</p> <p>Voir l'analyse par HAZOP (nœud 1)</p>			

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
Brûleurs	Assurer le mélange intime de l'air et du combustible de manière à ce que la combustion soit complète. Produire une flamme régulière et stable pour permettre un bon chauffage de la charge.	Colmatage des becs du brûleur par des dépôts de suie Usure des pièces d'un brûleur tel que l'électrodes d'allumage Fuite de gaz Défaut d'allumage des brûleurs : Défaut de flamme	Usure liée à un usage prolongé.	Retour de flamme au niveau de brûleur	2	3	6	Les brûleurs doivent être régulièrement inspectés afin de repérer les éventuelles anomalies, notamment les signes d'usure ou de corrosion des pièces Le personnel doit recevoir une formation adéquate afin de garantir que les modifications apportées aux brûleurs (pression et débit du gaz, hauteur de la flamme, etc.) sont effectuées correctement. la construction d'un système d'arrêt automatique pour interrompre l'alimentation en gaz en cas de retour de flamme et l'utilisation de détecteurs de flamme pour	1	2	2
			Phénomène de corrosion lié aux températures élevées et aux gaz contenant des matières corrosives.	Accumulation de gaz inflammables dans le four							
			Surchauffe du brûleur due à une mauvaise combustion ou un débit de gaz trop élevé	Diminution de la performance du four							
			Formation de dépôts de suie Un ajustement incorrect risque d'entraîner une combustion incomplète. Accumulation de gaz combustible lors de	Diminution du taux charge Production accrue de gaz de combustion, qui peut accroître les émissions polluantes							

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
			plusieurs tentatives d'allumage	<p>Risque d'incendie et explosion : feu de nappe, feu de jet, explosion UVCE</p> <p>Présence d'une atmosphère explosible dans la chambre de combustion du four 21-F : explosion confinée</p>				<p>détecter les retours de flamme.</p> <p>L'installation d'équipements de sécurité, tels que des soupapes de décharge, afin de limiter l'accumulation de pression dans le système de gaz.</p> <p>L'installation des équipements de détection des incendies pour donner aux opérateurs une longueur d'avance en cas d'urgence.</p> <p>Trappe d'explosion.</p> <p>Ronde opérateur.</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection</p>			

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
								avec alarme et intervention de l'opérateur : alarme en cas de basse température. un plan d'entretien et de nettoyage réguliers des becs de brûleurs et des orifices d'air, avec réparation de toutes les pièces usées. (élimination des dépôts de suie sur la surface extérieure des brûleurs) durant la rénovation			

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
Dumper (registre)	Réguler le tirage de la cheminée du four afin de contrôler la quantité de gaz de combustion évacués dans l'atmosphère.	Obstruction du registre Déformation ou détérioration du dumper	Les résidus de combustion, susceptibles de provoquer des problèmes de tirage dans la cheminée. L'augmentation de la température entraîne la détérioration du dumper Utilisation prolongée de l'élément	Accumulation de gaz combustibles dans la chambre de combustion L'augmentation de la pression Consommation d'énergie (combustible) Risque d'incendie et explosion : feu de nappe, feu de jet, explosion UVCE	3	3	9	Dans ce cas, il est important de noter que ces incendies sont rares et qu'ils sont généralement évités grâce à un entretien régulier du dumper, qui comprend des inspections visuelles Cependant, ce composant joue un rôle important dans la sécurité du four et il faut savoir que la défaillance de ce dernier génère un risque important dont l'origine est la surpression de la chambre de combustion suite à l'accumulation de fumées Procédure de maintenance préventive	2	2	4

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
								Ronde opérateur Remontage du nouveau dumper durant les travaux de rénovation			
Opacimètre	Servant à mesurer le degré d'opacité des fumées dégagées par la cheminée du four	Sonde défectueuse Mesure imprécise de la densité optique des fumées	Une sonde endommagée ou mal placée peut entraîner des mesures erronées. Défaillance du système optique. Dysfonctionnement du système de traitement des signaux.	Une pollution atmosphérique accrue et des émissions polluantes, qui peuvent avoir un impact sur l'environnement.	1	2	2	Dans le cas où l'opacimètre est défectueux ou donne des mesures incorrectes, aucun événement n'a été signalé selon notre étude.	1	2	2

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
Analyseur d'oxygène	Servir à déterminer la teneur en oxygène des gaz de combustion.	<p>Dysfonctionnement de l'instrument peuvent entraîner des erreurs de mesure.</p> <p>La sonde d'oxygène est contaminée ou obstruée.</p>	<p>Présence de suie ou de particules sur le capteur d'oxygène peut diminuer sa sensibilité</p> <p>Ancienneté de l'appareil d'analyse.</p>	<p>Contrôle inadéquat de la combustion.</p> <p>Utilisation excessive de combustible. Il peut alors y avoir des frais supplémentaires de combustible et le rendement du four peut s'en trouver réduit.</p>	3	2	6	<p>Bien qu'aucun accident dangereux n'ait été signalé au niveau du four ou de l'unité dans notre cas, l'analyseur d'oxygène a été considéré comme défectueux car il générerait des mesures imprécises dans l'industrie. Les opérateurs ont utilisé diverses méthodes de contrôle de la combustion, telles que l'abaissement du taux de charge, afin d'éviter une consommation excessive de combustible due à un excès d'oxygène inutile pour la combustion</p> <p>prévoir la mise en place d'un nouvel analyseur d'oxygène lors de la rénovation</p>	2	1	2

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
Déprimomètre	Dispositif utilisé pour mesurer la dépression dans une conduite de fumée. Par ailleurs, il s'agit d'une dépression car la cheminée évacue les fumées	<p>Dysfonctionnement du composant</p> <p>Des mesures inexactes</p> <p>Obstruction</p> <p>Usure des composants internes</p> <p>Diminution de la sensibilité de la mesure ou une perte de précision.</p>	<p>En raison de l'écoulement permanent du fluide, les pièces intérieures du déprimomètre peuvent se dégrader au fil du temps.</p> <p>Dépôts de particules obstruant les passages du déprimomètre</p> <p>Conditions environnementales extrêmes, notamment des températures trop élevées</p>	<p>Phénomène de condensation à l'intérieur du conduit (cheminée) qui entrainera son encrassement avec des conséquences qui peuvent être dramatiques. (Obstruction, refoulement, feu de cheminée...)</p>	1	4	4	<p>Un déprimomètre peut tomber en panne plus ou moins fréquemment en fonction d'un certain nombre de facteurs, notamment la durée de vie escomptée du dispositif, le mode d'entretien, l'environnement dans lequel il fonctionne et les procédures de contrôle. Les défaillances peuvent être rares si le déprimomètre est placé correctement, entretenu en continu et surveillé efficacement. En revanche, une défaillance du déprimomètre est plus probable en cas de défaut de conception, de fabrication ou de</p>	1	3	3

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
								<p>maintenance inadéquate. Pour identifier les éventuels signes de défaillance du déprimomètre et y remédier rapidement, il est essentiel de mettre en place des pratiques régulières d'entretien préventif. Le fonctionnement du déprimomètre peut également être surveillé en permanence afin de détecter les nouveaux problèmes et d'éviter les pannes critiques. Dans notre cas, aucun événement est survenu mais cela reste un élément important à prendre en considération et à ne pas négliger du fait qu'il est essentiel au maintien de la sécurité</p>			

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
								et de la performance du four.			
Matériaux d'isolation (mur réfractaire)	Limiter toute perte de chaleur vers l'extérieur et assurer une température uniforme à l'intérieur du four, et de résister aux températures élevées	<p>Dégradation du matériau isolant</p> <p>Déformation ou affaissement du mur réfractaire</p> <p>Fissures dans l'isolant</p> <p>Formation des ponts thermiques</p>	<p>Exposition à des températures extrêmement élevées</p> <p>Vieillessement dû à l'utilisation prolongée du mur réfractaire</p>	<p>Déperdition de chaleur et l'inefficacité énergétique, qui entraînent une diminution du rendement du four.</p> <p>Augmentation de la consommation d'énergie (combustible) nécessaire pour garder la température demandée, ce qui entraîne une augmentation des dépenses énergétiques.</p> <p>Mettre en péril l'intégrité</p>	2	3	6	<p>Le mur réfractaire d'un four étant endommagé, il peut en résulter des problèmes de fonctionnement, tels qu'une réduction de la performance énergétique. Dans le cas particulier que nous avons étudié, le mur réfractaire a été complètement rénové en conséquence, ce qui fait qu'il ne semble pas être une cause directe de l'incendie du four. Les causes de l'incendie du four dans notre situation sont toutefois liées à d'autres éléments. Même si le mur réfractaire n'est pas directement impliqué dans l'incendie, il n'en</p>	2	2	4

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
				structurale du four et requérir de coûteuses réparations.				demeure pas moins qu'il s'agit d'un élément crucial du fonctionnement du four. Afin d'éviter sa dégradation ou son usure excessive, il est conseillé de vérifier son état, de réaliser périodiquement des inspections et de mettre en place des actions correctives.			

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
<p>· Instruments de contrôle (thermocouple de peau, thermocouple de fluide)</p>	<p>· Pour indiquer la température de la paroi extérieure du tube et la température des fumées. Le relevé de la température est enregistré et transmis à la salle de contrôle.</p>	<p>· Défaut de mesure : une lecture erronée de la température voire une sensibilité réduite du thermocouple.</p> <p>Des relevés de température incorrects, mettant en péril la capacité du système de contrôle à réguler efficacement le four.</p> <p>Encrassement des thermocouples.</p> <p>Déformation des thermocouples.</p>	<p>Dégradation des composants du thermocouple, à la rupture du fil conducteur, ou encore à une corrosion ou oxydation importante</p> <p>Des dépôts de suie, de poussière sur la surface de mesure.</p> <p>Conditions de service sévères, notamment en cas de températures extrêmes,</p>	<p>· Perturbation du contrôle de la température du four</p> <p>Risque d'avoir un impact sur la qualité des produits ou des procédés mis en œuvre, ainsi que sur le rendement du four.</p> <p>Danger de surchauffe</p>	2	3	6	<p>· Les thermocouples sont souvent des composants fiables et résistants, capables de supporter des conditions de fonctionnement sévères. Il est possible de réduire les défauts en les entretenant correctement et en les inspectant de manière périodique. Dans le cas étudié, ces instruments de contrôle ne sont pas à l'origine de l'incendie du four. D'autres causes sont à l'origine de l'accident notamment : vieillissement du métal (tubes), corrosion, colmatage des brûleurs, formation de coke à l'intérieur des tubes etc. qui ont conduit à la destruction de ces</p>	2	2	4

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
								indicateurs de contrôle, lesquels ont été changés pendant les travaux de rénovation.			
Contrôleur de flamme	Il veille à ce que le système de combustion fonctionne le plus efficacement possible en détectant l'existence ou l'absence d'une flamme.	<p>Défaillance du capteur.</p> <p>Indications fausses sur la présence ou l'absence de flamme ou sur son intensité.</p>	<p>Les composants du contrôleur sont endommagés.</p> <p>Mauvais raccordement affecte la transmission du signal entre le contrôleur et le capteur de flamme.</p>	Il peut arriver que des accidents comme un feu de nappe, un feu de jet ou une explosion d'UVCE se produisent. Ces événements dépendent des conséquences spécifiques, notamment de la présence de combustibles inflammables, leur concentration dans le four et	2	3	6	<p>Les contrôleurs de flamme obéissent à des normes et à des réglementations strictes et sont périodiquement soumis à des opérations d'entretien et d'inspection afin de garantir leur efficacité. Pour réduire le risque d'incendie ou d'explosion en cas de dysfonctionnement du contrôleur de flamme, des systèmes de sécurité supplémentaires comme les systèmes de détection de gaz et les protocoles d'urgence se</p>	1	2	2

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies d'un four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Composants	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système ou/et sous-système	Risques avant réduction			Commentaires : Mesures de prévention /Actions correctives (Travaux de rénovation)	Risques après réduction		
					O	G	C (IPR)		O'	G'	C' (IPR)
				<p>les conditions de service.</p> <p>Cependant, de telles situations restent généralement rares vu les conditions de sécurité strictes imposées pour ce composant</p>				<p>sont mis en place. Dans notre cas, ce composant n'est pas à l'origine de l'incendie du four 21F1.</p> <p>Procédure de maintenance Préventive</p> <p>Ronde opérateur</p> <p>Voir l'analyse par HAZOP (nœud 1) car la flamme dépend de la quantité du gaz combustible et des mesures de sécurité à adopter dans ce cas.</p>			

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

N.B :

Dans l'étude HAZOP, nous avons pris en considération deux nœuds, d'une part parce qu'il existe un lien indissociable entre les deux, et d'autre part pour mieux comprendre les sources de déviations du processus (pression, température, débit). Le nœud 1 correspond au transfert du gaz combustible vers les brûleurs du four 21F1, et le nœud 2 correspond à la distribution de la charge à l'intérieur du four 21F1 depuis l'entrée, ainsi qu'à l'évacuation des fumées.

Tableau VI.6. Résultats de l'étude HAZOP – Feuille de travail Nœud n°01 et Nœud n°02

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Noeud	Déviation	Causes	Conséquences	Mesures de contrôles	Commentaire : Actions / Recommandations
<p>Nœud 1 : Transfert du Gaz combustible vers brûleurs du four 21F1</p>	<p>Pas de Débit (vers brûleurs du four 21F1)</p>	<p>Vanne PCV 3 bloquée en position fermée (défaillance Mécanique, une obstruction ou l'encrassement) prévient l'acheminement du combustible vers les brûleurs et donc l'alimentation du four en combustible</p>	<p>Le processus de combustion est interrompu et la température du four est diminuée.</p> <p>Pas de production (arrêt de l'unité)</p>	<p>PT 3 : Transmetteur de pression. PIC 3 : Contrôleur de pression pour commander la vanne PCV 3.</p> <p>FT 3 : Transmetteurs de débit. FRC 3 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 3.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Détecteur de pression basse de fuel gaz et arrêt automatique du four.</p>	<p>Si la vanne de régulation de pression PCV 3 est bloquée en position fermée alors que les brûleurs ne sont pas alimentés en combustible, il peut y avoir un problème au niveau de la vanne elle-même ou au niveau du PIC 3 qui commande la vanne. Comme la pression ne peut pas être contrôlée de manière adéquate dans cette situation, le combustible ne peut pas atteindre les brûleurs ou alimenter le four. L'absence de débit de combustible peut également provenir d'autres sources, comme des problèmes au niveau de la vanne de débit</p> <p>·</p> <p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes PCV 3 / FCV 3.</p> <p>Pour signaler tout changement d'état de la vanne, il est également préférable de mettre en place des alarmes et des alertes visuelles ou sonores dans la salle de contrôle. À titre d'exemple, si la vanne est bloquée en position fermée/ouverte, une alarme signalera instantanément le problème aux opérateurs via</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

					un capteur qui peut être raccordé à un système de contrôle qui indique en temps réel l'état de la vanne sur l'écran de contrôle.
		Rupture dans la conduite de gaz combustible	<p>Pas de production (arrêt de l'unité)</p> <p>Risque d'incendie / explosion</p> <p>Risque de blessures humaines et/ou fatalités</p>	<p>Arrêt automatique du four soit par le bouton d'arrêt d'urgence ou par le BAMS :</p> <p>HCO 1 : bouton arrêt d'urgence coté haut du four 21F1</p> <p>HCO 2 : bouton arrêt d'urgence salle de contrôle</p> <p>HCO 3 : bouton arrêt d'urgence coté bas du four 21F1</p> <p>HCO 4 : bouton arrêt d'urgence côté fuel gaz</p> <p>Mise en œuvre des plans d'urgence PII</p> <p>Système détection de gaz</p> <p>Réseau anti-incendie (moyens fixes et mobile)</p>	<p>Veiller à ce que l'ensemble du personnel du site soit informé du code d'alerte à utiliser en cas d'accident et du comportement à adopter en matière de sécurité.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : ajouter un détecteur de flamme qui va conduire à l'arrêt du four</p> <p>Il est nécessaire de renforcer les rondes d'inspection au moyen d'une procédure bien définie.</p> <p>Caméras de Télésurveillance (sur site)</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

				Ronde opérateur	
	Moins de Débit (vers brûleurs du four 21F1)	Vanne FCV 3 bloquée en position partiellement fermée (défaillance mécanique, corrosion, l'usure ou l'encrassement des composants internes de la vanne)	<p>Baisse de pression au niveau des brûleurs du four 21F1.</p> <p>Diminution de l'intensité de la flamme (perte ou absence de flamme).</p> <p>Diminution du flux de combustible vers les brûleurs, Perte de puissance de combustion.</p> <p>Diminution de la température à l'intérieur du four 21F1.</p> <p>Impact négatif sur les performances du four, menant à une mauvaise efficacité énergétique,</p> <p>Qualité médiocre de la combustion.</p>	<p>FT3 : Transmetteurs de débit.</p> <p>FRC3 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV3.</p> <p>Détecteur de pression basse de fuel gaz et arrêt automatique du four.</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p> <p>Ronde opérateur.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : alarme en cas de basse température de sortie de produit.</p>	<p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : ajouter un détecteur de flamme qui va conduire à l'arrêt du four.</p> <p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes PCV3/ FCV3.</p> <p>Barriere de protection : Trappe d'explosion,</p> <p>le rôle principal d'une trappe de protection contre les explosions est de donner aux pressions et aux flammes produites par une explosion une voie d'évacuation contrôlée. Créée pour résister à la pression explosive, elle s'ouvre lorsqu'elle atteint une valeur critique, permettant une évacuation en toute sécurité de l'énergie explosive.</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

		<p>Défaut au niveau de la commande de la vanne FCV 3 (dysfonctionnement du FRC 3 ou commande erronée de l'ouverture de la vanne par l'opérateur).</p>	<p>Même conséquences</p>	<p>Mêmes mesures de contrôle</p>	<p>Maintenir un programme de formation des opérateurs sur les procédures opérationnelles et les procédures d'arrêt d'urgence.</p>
		<p>Fuite (importante) sur la ligne de gaz combustible vers les brûleurs.</p>	<p>Baisse de pression au niveau des brûleurs du four 21F1.</p> <p>Diminution de l'intensité de la flamme (perte ou absence de flamme).</p> <p>Diminution du flux de combustible vers les brûleurs, Perte de puissance de combustion.</p> <p>Diminution de la température à l'intérieur du four 21F1.</p> <p>Impact négatif sur les performances du four, menant à une mauvaise efficacité énergétique,</p>	<p>PT3 : Transmetteur de pression.</p> <p>PIC3 : Contrôleur de pression pour commander la vanne PCV3.</p> <p>FT3 : Transmetteurs de débit.</p> <p>FRC3 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV3.</p> <p>Arrêt automatique du four soit par le bouton d'arrêt d'urgence ou par le BAMS :</p> <p>HCO 1 : bouton arrêt d'urgence coté haut du four 21F1.</p>	<p>Veiller à ce que l'ensemble du personnel du site soit informé du code d'alerte à utiliser en cas d'accident et du comportement à adopter en matière de sécurité.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : ajouter un détecteur de flamme qui va conduire à l'arrêt du four.</p> <p>Il est nécessaire de renforcer les rondes d'inspection au moyen d'une procédure bien définie.</p> <p>Caméras de Télésurveillance (sur site).</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

			<p>Qualité médiocre de la combustion.</p> <p>Présence d'une atmosphère explosible dans la chambre de combustion du four 21-F1 : explosion Confinée.</p>	<p>HCO 2 : bouton arrêt d'urgence salle de contrôle.</p> <p>HCO 3 : bouton arrêt d'urgence coté bas du four 21F1.</p> <p>HCO 4 : bouton arrêt d'urgence côté fuel gaz.</p> <p>Mise en œuvre des plans d'urgence PII.</p> <p>Système détection de gaz.</p> <p>Réseau anti-incendie (moyens fixes et mobile).</p> <p>Ronde opérateur.</p> <p>Détecteur de pression basse de fuel gaz et arrêt automatique du four.</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : alarme en cas de basse température de sortie de produit</p>	
--	--	--	---	--	--

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

	<p>Plus de Débit (vers brûleurs du four 21F1).</p>	<p>Vanne FCV 3 bloquée en position ouverte (défaillance mécanique, corrosion, l'usure ou l'encrassement des composants internes de la vanne).</p>	<p>Flamme intense susceptible de provoquer une surchauffe des tubes du four.</p> <p>Défavoriser la réaction de combustion.</p> <p>Perte de confinement du BRA dans le four 21-F1 risque de départ d'incendie dans le four.</p> <p>Augmentation importante de température et de pression risquant d'entraîner une explosion ou une rupture de la chambre de combustion.</p> <p>Fragilisation des tubes et risque de dépasser la température de design des tubes dans les fours (fissuration).</p> <p>Efficacité énergétique réduite : Un débit de combustible trop élevé et non régulé fait que l'unité consomme plus de</p>	<p>FT3 : Transmetteurs de débit</p> <p>FRC3 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV3.</p> <p>TI des tubes de four (indicateur de température)</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : alarme en cas de haute température de peau (niveau haut et très haut) et alarme en cas de DeltaP entre sommet et bas du four trop important dans le four et alarme de pression haute.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Arrêt four en cas de niveau très haut de la température en sortie four (440°C).</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p>	<p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes PCV3 / FCV3.</p> <p>Pour signaler tout changement d'état de la vanne, il est également préférable de mettre en place des alarmes et des alertes visuelles ou sonores dans la salle de contrôle. À titre d'exemple, si la vanne est bloquée en position fermée/ouverte, une alarme signalera instantanément le problème aux opérateurs via un capteur qui peut être raccordé à un système de contrôle qui indique en temps réel l'état de la vanne sur l'écran de contrôle.</p> <p>L'Injection de vapeur d'eau agit en envoyant de la vapeur dans la conduite du combustible. Le mélange combustible devient par conséquent moins concentré par dilution. Cela permet de maintenir le mélange de combustible sûr dans de la chambre de combustion et d'éviter la surcharge du système.</p>
--	--	---	---	---	--

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

			combustible que nécessaire, ce qui peut entraîner une inefficacité énergétique. Cela a pour effet d'augmenter les dépenses d'exploitation.	Ronde opérateur.	
	Défaut du contrôleur de vanne FCV 3 ou PCV 3 (dysfonctionnement de FRC 3/PIC 3 ou commande erronée de l'ouverture de la vanne réalisée par l'opérateur).	<p>Flamme intense susceptible de provoquer une surchauffe des tubes du four.</p> <p>Défavoriser la réaction de combustion.</p> <p>Perte de confinement du BRA dans le four 21-F1 risque de départ d'incendie dans le four.</p> <p>Augmentation importante de température et de pression risquant d'entraîner une explosion ou une rupture de la chambre de combustion.</p> <p>Fragilisation des tubes et risque de dépasser la température de design des</p>		Mêmes mesures de contrôle ci-dessus.	<p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes PCV3 / FCV3.</p> <p>Pour signaler tout changement d'état de la vanne, il est également préférable de mettre en place des alarmes et des alertes visuelles ou sonores dans la salle de contrôle. À titre d'exemple, si la vanne est bloquée en position fermée/ouverte, une alarme signalera instantanément le problème aux opérateurs via un capteur qui peut être raccordé à un système de contrôle qui indique en temps réel l'état de la vanne sur l'écran de contrôle.</p> <p>Maintenir le programme de formation des opérateurs sur les procédures opérationnelles et les procédures d'arrêt d'urgence.</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

			<p>tubes dans les fours (fissuration).</p> <p>Efficacité énergétique réduite : Un débit de combustible trop élevé et non régulé fait que l'unité consomme plus de combustible que nécessaire, ce qui peut entraîner une inefficacité énergétique. Cela a pour effet d'augmenter les dépenses d'exploitation.</p>		<p>L'Injection de vapeur d'eau agit en envoyant de la vapeur dans la conduite du combustible. Le mélange combustible devient par conséquent moins concentré par dilution. Cela permet de maintenir le mélange de combustible sûr dans de la chambre de combustion et d'éviter la surcharge du système.</p>
	Basse Pression	<p>L'une des vannes PCV 3 ou FCV 3 est bloquée en position partiellement fermée (défaillance mécanique, corrosion, l'usure ou l'encrassement des composants internes de la vanne).</p>	<p>Pression faible au niveau des brûleurs.</p> <p>cokéfaction des tubes (Réduction de l'efficacité du transfert de chaleur vers le produit à chauffer BRA).</p> <p>Diminution de l'intensité de la flamme (Perte ou absence de flamme).</p> <p>Combustion incomplète dans la chambre de Combustion.</p>	<p>FT3 : Transmetteurs de débit</p> <p>FRC3 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV3.</p> <p>PT3 : Transmetteur de pression</p> <p>PIC3 : Contrôleur de pression pour commander la vanne PCV3.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Détecteur de pression basse</p>	<p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes PCV3 / FCV3.</p> <p>Pour signaler tout changement d'état de la vanne, il est également préférable de mettre en place des alarmes et des alertes visuelles ou sonores dans la salle de contrôle. À titre d'exemple, si la vanne est bloquée en position fermée/ouverte, une alarme signalera instantanément le problème aux opérateurs via un capteur qui peut être raccordé à un système de contrôle qui indique en temps réel l'état de la vanne sur l'écran de contrôle.</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

			<p>Diminution de la température dans le four 21F1.</p> <p>Diminution la performance du four.</p>	<p>de fuel gaz et arrêt automatique du four.</p> <p>Ronde opérateur.</p>	
		<p>Défaut du contrôleur de vanne FCV3 ou PCV 3 (dysfonctionnement de FRC3/PIC 3 ou commande erronée d'ouverture de la vanne réalisée par l'opérateur)</p>	<p>Mêmes conséquences ci-dessus.</p>	<p>FT3 : Transmetteurs de débit.</p> <p>FRC3 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV3.</p> <p>PT3 : Transmetteur de pression.</p> <p>PIC 3 : Contrôleur de pression pour commander la vanne PCV 3.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Détecteur de pression basse de fuel gaz et arrêt automatique du four.</p>	<p>Maintenir le programme de formation des opérateurs sur les procédures opérationnelles et les procédures d'arrêt d'urgence.</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

				Ronde opérateur	
		Fuite (importante) sur la ligne de gaz combustible vers les brûleurs.	même scénario que dans le cas de « moins de débit »	même situation que dans le cas de « moins de débit »	<p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Détecteur de Flamme qui va conduire à l'arrêt du four.</p> <p>Veiller à ce que l'ensemble du personnel du site soit informé du code d'alerte à utiliser en cas d'accident et du comportement à adopter en matière de sécurité.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : ajouter un détecteur de flamme qui va conduire à l'arrêt du four.</p> <p>Il est nécessaire de renforcer les rondes d'inspection au moyen d'une procédure bien définie.</p>
	Haute Pression	Vanne FCV 3 bloquée en position ouverte (défaillance mécanique, corrosion, l'usure ou l'encrassement des composants internes de la vanne).	<p>Pression élevée au niveau des brûleurs.</p> <p>Flamme intense susceptible de provoquer une surchauffe des tubes du four.</p>	même mesure que dans le cas de « plus de débit »	<p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes PCV3 / FCV3.</p> <p>Pour signaler tout changement d'état de la vanne, il est également préférable de mettre en place des alarmes et des alertes visuelles ou sonores dans la salle de contrôle. À titre d'exemple, si la vanne est bloquée en position fermée/ouverte, une</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

			<p>Défavoriser la réaction</p> <p>Perte de confinement du BRA dans le four 21-F1 risque de départ d'incendie dans le four.</p> <p>Augmentation importante de température et de pression risquant d'entraîner une explosion ou une rupture de la chambre de combustion.</p> <p>Fragilisation des tubes et risque de dépasser la température de design des tubes dans les fours (fissuration).</p>		<p>alarme signalera instantanément le problème aux opérateurs via un capteur qui peut être raccordé à un système de contrôle qui indique en temps réel l'état de la vanne sur l'écran de contrôle.</p> <p>Injection de vapeur d'eau en tant que barrière protectrice.</p>
		<p>Défaut du contrôleur de vanne FCV 3 ou PCV 3 (dysfonctionnement de FRC 3/PIC 3 ou commande erronée d'ouverture de la vanne réalisée par l'opérateur)</p>	<p>Flamme intense susceptible de provoquer une surchauffe des tubes du four.</p> <p>Défavoriser la réaction.</p> <p>Perte de confinement du BRA dans le four 21-F1</p>	<p>même mesure que dans le cas de « plus de débit »</p>	<p>Mêmes commentaires que ci-dessus</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

			<p>risque de départ d'incendie dans le four.</p> <p>Augmentation importante de température et de pression risquant d'entraîner une explosion ou une rupture de la chambre de combustion.</p> <p>Fragilisation des tubes et risque de dépasser la température de design des tubes dans les fours (fissuration).</p>		
	Basse Température	/	/	<p>Dans le cas du chauffage thermique du produit, l'objectif est de parvenir à des températures suffisamment élevées pour pouvoir chauffer le produit, une température basse du combustible ne serait pas adaptée.</p>	<p>Dans notre cas, le combustible utilisé pour alimenter le four a un point d'éclair de -187°C, une température d'auto-inflammation de 595°C et un point d'ébullition de -161°C, et la température maximale de fonctionnement du four est de 40°C amenée par le combustible vers les brûleurs. On peut en déduire ce qui suit :</p> <p>Basse température : La température du combustible étant de 40°C, cela signifie que le combustible utilisé ne sera pas exposé à des températures critiques qui pourraient entraîner des problèmes tels qu'une vaporisation indésirable.</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

					Haute température : la température maximale du fuel gaz reste inférieure à la température d'auto-inflammation (595°C), Pour éviter les situations dangereuses, il convient toutefois de mettre en place des mesures adéquates de contrôle afin de maintenir la température dans une plage sécuritaire en prenant en compte les caractéristiques du combustible utilisé. Les risques potentiels liés à la température sont ainsi évités.
	Haute Température	Température ambiante plus élevé	Pas de conséquence	La mise en œuvre de procédures de maintenance préventive et de rondes régulières de l'opérateur est toujours recommandée. Le but de ces mesures est de veiller au bon fonctionnement du système d'alimentation en combustible et de détecter d'éventuels dysfonctionnements ou pannes.	Idem
		/ (non applicable)	/	/	

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

<p>Noeud 2 : Depuis l'entrée jusqu'à la répartition de la charge à l'intérieur du four 21F1 ainsi que l'extraction des fumées.</p>	<p>Pas de Débit (la charge BRA)</p>				
	<p>Moins de Débit (la charge BRA).</p>	<p>Vanne FCV 1 de la charge (ligne1) bloquée en position fermée ou partiellement fermée (défaillance mécanique, une obstruction ou l'encrassement).</p>	<p>Pression faible à l'entrée du four 21F1.</p> <p>Montée en Température fragilisation des tubes (risque de fissuration/rupture)</p> <p>Débit de la charge de la ligne 1 plus important que la ligne 2 à l'entrée de four 21F1 qui peut engendrer un encrassement/ cokéfaction des tubes de four 21F1 (formation des cokes).</p> <p>Le fait que la charge ne soit pas chauffée de manière uniforme peut</p>	<p>FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1).</p> <p>FT 2 : Transmetteurs de débit (ligne 2).</p> <p>FRC 1 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 1.</p> <p>FRC 2 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 2.</p> <p>TI des tubes de four 21F1 : Indicateurs de Température</p> <p>Ronde opérateur</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et</p>	<p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes FCV.</p> <p>Pour signaler tout changement d'état de la vanne, il est également préférable de mettre en place des alarmes et des alertes visuelles ou sonores dans la salle de contrôle. À titre d'exemple, si la vanne est bloquée en position fermée/ouverte, une alarme signalera instantanément le problème aux opérateurs via un capteur qui peut être raccordé à un système de contrôle qui indique en temps réel l'état de la vanne sur l'écran de contrôle.</p> <p>Etudier l'installation de TI (indicateurs de température) placés dans tous les tubes du four 21F1 (64 tubes) afin de suivre de manière efficace le phénomène de surchauffe dans le four.</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

			avoir un impact défavorable sur la performance du four.	intervention de l'opérateur : Alarme bas débit et intervention de l'opérateur.	
			Diminution de la qualité des produits durant les phases ultérieures.	Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Arrêt du four par détection débit bas à l'entrée du four.	
				Procédure de maintenance Préventive.	
		Vanne FCV2 de la charge (ligne 2) bloquée en position fermée ou partiellement fermée (défaillance mécanique, une obstruction ou l'encrassement).	Pression faible à l'entrée du four 21F1. Montée en Température fragilisation des tubes (risque de fissuration/rupture). Débit de la charge de la ligne 2 plus important que la ligne 1 à l'entrée de four 21F1 qui peut engendrer un encrassement/ cokéfaction des tubes de four 21F1 (formation des cokes).	FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1). FT 2: Transmetteurs de débit (ligne 2). -FRC 1 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 1. -FRC 2 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 2. TI des tubes de four 21F1 : Indicateurs de température.	Même remarques ci-dessus

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

			<p>Le fait que la charge ne soit pas chauffée de manière uniforme peut avoir un impact défavorable sur la performance du four.</p> <p>Diminution de la qualité des produits durant les phases ultérieures.</p>	<p>Ronde opérateur.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : Alarme bas débit et intervention de l'opérateur</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Arrêt du four par détection débit bas à l'entrée du four.</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p>	
		<p>Défaut au niveau de la commande de la vanne FCV 1 ou FCV 2 (dysfonctionnement du FRC 1 ou FRC 2 commande erronée de l'ouverture de la vanne par l'opérateur).</p>	<p>Mêmes conséquences pour la ligne 1 ou la ligne 2 selon l'endroit où la défaillance s'est déclarée.</p>	<p>FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1).</p> <p>FT 2 : Transmetteurs de débit (ligne 2).</p> <p>TI des tubes de four 21F1 : Indicateurs de Température</p> <p>Ronde opérateur</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : Alarme bas débit et intervention de l'opérateur</p>	<p>Maintenir le programme de formation des opérateurs sur les procédures opérationnelles et les procédures d'arrêt d'urgence.</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

				<p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Arrêt du four par détection débit bas à l'entrée du four.</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p>	
	Fuite (importante) dans la ligne 1 ou la ligne 2 (BRA)	<p>Suppression dans la ligne 1 ou la ligne 2</p> <p>Perte de confinement du BRA dans le four 21F1 : départ de feu dans le four.</p>	<p>FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1).</p> <p>FT 2 : Transmetteurs de débit (ligne 2).</p> <p>FRC 1 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 1.</p> <p>FRC 2 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 2.</p> <p>TI des tubes de four 21F1 : Indicateurs de température.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : Alarme bas débit et intervention de l'opérateur.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité :</p>	<p>Veiller à ce que l'ensemble du personnel du site soit informé du code d'alerte à utiliser en cas d'accident et du comportement à adopter en matière de sécurité.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : ajouter un détecteur de flamme qui va conduire à l'arrêt du four</p> <p>·Il est nécessaire de renforcer les rondes d'inspection au moyen d'une procédure bien définie.</p>	

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

				<p>Arrêt du four par détection débit bas à l'entrée du four.</p> <p>HCO 1 : bouton arrêt d'urgence coté haut du four 21F1.</p> <p>HCO 2 : bouton arrêt d'urgence salle de contrôle.</p> <p>HCO 3 : bouton arrêt d'urgence coté bas du four 21F1.</p> <p>HCO 4 : bouton arrêt d'urgence côté fuel gaz.</p> <p>Ronde opérateur.</p> <p>Mise en œuvre des plans d'urgence (PII).</p> <p>Système détection de gaz</p> <p>Réseau anti-incendie (moyens fixes et mobile).</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p>	
		Vanne FCV 1 de la charge (ligne1) bloquée en position ouverte	possibilité que le débit de BRA de la ligne 1 soit supérieur que la ligne 2 à l'entrée de four 21F1 qui peut engendrer un	<p>FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1).</p> <p>FT 2 : Transmetteurs de débit (ligne 2).</p>	Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes FCV

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

	plus de Débit (la charge BRA)	(défaillance mécanique, une obstruction ou l'encrassement).	encrassement/ cokéfaction des tubes de four (montée en Température : fragilisation des tubes). Impact défavorable sur la performance du four. Surpression dans la ligne 1 Perte de confinement du BRA dans le four 21F1 : départ de feu dans le four (Lorsqu'il y a une augmentation du débit, ce qui arrive rarement, elle est souvent contrôlée en respectant une marge de sécurité. Il est essentiel de garder à l'esprit que cette éventualité peut toutefois s'avérer potentiellement dangereuse.)	FRC 1 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 1. FRC 2 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 2. TI des tubes de four 21F1 : Indicateurs de Température.	Pour signaler tout changement d'état de la vanne, il est également préférable de mettre en place des alarmes et des alertes visuelles ou sonores dans la salle de contrôle. À titre d'exemple, si la vanne est bloquée en position fermée /ouverte, une alarme signalera instantanément le problème aux opérateurs via un capteur qui peut être raccordé à un système de contrôle qui indique en temps réel l'état de la vanne sur l'écran de contrôle. Etudier l'installation de TI (indicateurs de température) placés dans tous les tubes du four 21F1 (64 tubes) afin de suivre de manière efficace le phénomène de surchauffe dans le four.
		Vanne FCV 2 de la charge (ligne 2) bloquée en position ouverte	possibilité que le débit de BRA de la ligne 2 soit supérieur que la ligne 1 à	FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1).	Mêmes commentaires que ci-dessus

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

		(défaillance mécanique, une obstruction ou l'encrassement).	l'entrée de four 21F1 qui peut engendrer un encrassement/ cokéfaction des tubes de four (montée en Température : fragilisation des tubes). Impact défavorable sur la performance du four. Surpression dans la ligne 2 Perte de confinement du BRA dans le four 21F1 : départ de feu dans le four (Lorsqu'il y a une augmentation du débit, ce qui arrive rarement, elle est souvent contrôlée en respectant une marge de sécurité. Il est essentiel de garder à l'esprit que cette éventualité peut toutefois s'avérer potentiellement dangereuse).	FT 2 : Transmetteurs de débit (ligne 2). FRC 1 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 1. FRC 2 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 2. TI des tubes de four 21F1 : Indicateurs de Température.	
		Défaut au niveau de la commande de la vanne FCV 1 ou FCV 2 (dysfonctionnement du FRC 1 ou FRC 2 commande erronée de	Mêmes conséquences pour la ligne 1 ou la ligne 2 selon l'endroit où la défaillance s'est déclarée.	FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1). FT 2 : Transmetteurs de débit (ligne 2).	Maintenir le programme de formation des opérateurs sur les procédures opérationnelles et les procédures d'arrêt d'urgence.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

		l'ouverture de la vanne par l'opérateur).		<p>FRC 1 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 1.</p> <p>FRC 2 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 2.</p> <p>TI des tubes de four 21F1 : Indicateurs de température.</p>	
	Basse Pression	Vanne FCV 1 de la charge (ligne1) ou Vanne FCV2 de la charge (ligne 2) bloquée en position fermée ou partiellement fermée (défaillance mécanique, une obstruction ou l'encrassement) ou défaut de contrôle FRC 1 / FRC 2	Mêmes conséquences que celles de « moins de débit » sur la ligne 1 ou la ligne 2 selon l'endroit où la défaillance s'est déclarée.	Mêmes mesures de contrôle que celles appliquées à la ligne 1 ou à la ligne 2 en cas de " moins de débit ".	Mêmes mesures de contrôle que celles appliquées à la ligne 1 ou à la ligne 2 en cas de " moins de débit ".
		Fuite (importante) dans la ligne 1 ou la ligne 2 (BRA).	Mêmes conséquences que "moins de débit" sur la ligne 1 ou la ligne 2, selon l'endroit où la fuite s'est produite.	<p>FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1).</p> <p>FT 2 : Transmetteurs de débit (ligne 2).</p> <p>FRC 1 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 1.</p>	<p>L'ajout de Caméras de Télésurveillance (sur site)</p> <p>Veiller à ce que l'ensemble du personnel du site soit informé du code d'alerte à utiliser en cas d'accident et du comportement à adopter en matière de sécurité.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : ajouter un détecteur de flamme qui va conduire à l'arrêt du four.</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

				<p>FRC 2 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 2.</p> <p>TI des tubes de four 21F1 : Indicateurs de Température</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : Alarme bas débit et intervention de l'opérateur.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : En cas de chute de pression, alarme au poste de contrôle et intervention de l'opérateur.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Arrêt du four par détection débit bas à l'entrée du four :</p> <p>HCO1 : bouton arrêt d'urgence coté haut du four 21F1.</p> <p>HCO 2 : bouton arrêt d'urgence salle de contrôle.</p>	<p>Il est nécessaire de renforcer les rondes d'inspection au moyen d'une procédure bien définie.</p>
--	--	--	--	--	--

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

				<p>HCO 3 : bouton arrêt d'urgence coté bas du four 21F1.</p> <p>HCO 4 : bouton arrêt d'urgence côté fuel gaz.</p> <p>Ronde opérateur</p> <p>Mise en œuvre des plans d'urgence (PII)</p> <p>Système détection de gaz</p> <p>Réseau anti-incendie (moyens fixes et mobile)</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p>	
		<p>Position de la vanne PCV 1 ou PCV 2 partiellement bloquée fermée (défaillance mécanique) ou erreur de commande de la vanne (dysfonctionnement du PIC 1 ou du PIC 2 ou mauvaise commande de la vanne par l'opérateur)</p>	<p>Pression faible dans la ligne 1 ou la ligne 2</p> <p>Débit faible de la charge vers le four 21F1, un impact défavorable sur la performance du four.</p> <p>Diminution de la qualité des produits durant les phases ultérieures</p>	<p>FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1).</p> <p>FT 2 : Transmetteurs de débit (ligne 2).</p> <p>FRC 1 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 1.</p> <p>FRC 2 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 2.</p>	<p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes FCV, PCV.</p> <p>Veiller à ce que l'ensemble du personnel du site soit informé du code d'alerte à utiliser en cas d'accident et du comportement à adopter en matière de sécurité.</p> <p>Il est nécessaire de renforcer les rondes d'inspection au moyen d'une procédure bien définie.</p>

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

				<p>PIC 1 : Contrôleur de pression pour commander la vanne PCV 1.</p> <p>PIC 2 : Contrôleur de pression pour commander la vanne PCV 2.</p> <p>Ronde opérateur.</p>	
	Augmentation de la vitesse de l'extraction des fumées	<p>Risque de dépression dans le four au-delà du seuil limité.</p> <p>Contraction des parois du four.</p> <p>Présence accrue d'air à l'intérieur du four qui peut éteindre les flammes des brûleurs 21F1.</p> <p>Diminution de la température à l'intérieur du four 21F1.</p> <p>Diminution de la performance du four (chauffage inefficace de la charge).</p>	<p>PDT 21F1 : Transmetteur de pression différentielle dans la boîte de 21F1.</p> <p>Ronde opérateur : Aperçu de fumées sortant du four.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur alarme en cas de Delta P entre sommet et bas du four trop important dans le four.</p>	<p>Prévoir un programme de maintenance préventive pour le système d'évacuation des fumées.</p> <p>Prévoir une sonde pour contrôler la vitesse de l'extraction des fumées à distance (salle de contrôle).</p>	

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

	Haute Pression	Diminution de la vitesse de l'extraction des fumées.	<p>Augmentation de la pression à l'intérieur du four 21F1 ou surpression du four.</p> <p>accumulation de fumées dans la chambre de combustion.</p> <p>Augmentation de la température dans le four 21F1.</p> <p>Risque de retour flamme et/ou augmentation de l'intensité de la flamme peut endommager les tubes et parois du four 21F1.</p>	<p>PDT 21F1 : Transmetteur de pression différentielle dans la boîte de 21F1.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur alarme en cas de DeltaP entre sommet et bas du four trop important dans le four.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur alarme en cas de haute température de peau (niveau haut et très haut).</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité Arrêt four en cas de niveau très haut de la température en sortie four (440°C)</p> <p>Ronde opérateur : Aperçu de fumées sortant du four.</p>	Mêmes actions que ci-dessus
--	----------------	--	---	--	-----------------------------

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

	<p>Vanne FCV 1 de la charge (ligne1) ou Vanne FCV 2 de la charge (ligne 2) bloquée en position ouverte (défaillance mécanique, une obstruction ou l'encrassement) Défaut au niveau de la commande de la vanne FRC1 ou FRC2.</p>	<p>augmentation de la pression à l'intérieur du four.</p> <p>Dommages au niveau de l'équipement : Une pression trop élevée peut endommager les tubes.</p> <p>Perte de contrôle de la charge : Une pression élevée incontrôlée peut perturber l'écoulement de la charge dans le four, ce qui réduit la performance du processus et entraîne une répartition insuffisante de la chaleur.</p> <p>risque d'explosion (Lorsqu'il y a une montée en pression de la charge, celle-ci est souvent contrôlée dans une plage sécuritaire, ce qui arrive rarement. Cependant, il est essentiel d'être conscient que cette situation présente un danger potentiel.)</p>	<p>FT 1 : Transmetteurs de débit (ligne 1).</p> <p>FT 2 : Transmetteurs de débit (ligne 2).</p> <p>FRC 1 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 1.</p> <p>FRC 2 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 2.</p> <p>PIC 1 : Contrôleur de pression pour commander la vanne PCV 1.</p> <p>PIC 2 : Contrôleur de pression pour commander la vanne PCV 2.</p> <p>TI des tubes de four 21F1 : Indicateurs de Température</p> <p>Procédure de maintenance préventive</p> <p>Ronde opérateur</p>	<p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes FCV.</p> <p>Pour signaler tout changement d'état de la vanne, il est également préférable de mettre en place des alarmes et des alertes visuelles ou sonores dans la salle de contrôle. À titre d'exemple, si la vanne est bloquée en position fermée /ouverte, une alarme signalera instantanément le problème aux opérateurs via un capteur qui peut être raccordé à un système de contrôle qui indique en temps réel l'état de la vanne sur l'écran de contrôle.</p> <p>Veiller à ce que l'ensemble du personnel du site soit informé du code d'alerte à utiliser en cas d'accident et du comportement à adopter en matière de sécurité.</p>
--	---	---	---	--

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

		la vanne PCV1 ou PCV2 bloquée en position ouverte (défaillance mécanique) ou erreur de commande de la vanne (dysfonctionnement du PIC 1 ou du PIC 2 ou mauvaise commande de la vanne par l'opérateur)	Mêmes conséquences que ci-dessus.	Mêmes mesures de contrôle que ci-dessus.	Mêmes actions que ci-dessus
	Basse Température	Changement de trajectoire des fumées dû à une défaillance mécanique ou à une erreur humaine de damper du Four 21F1.	Si le registre est bloqué dans une mauvaise position, il peut entraver l'écoulement des fumées dans le four, empêchant ainsi la charge d'être chauffée efficacement. Le processus de chauffage peut alors devenir inefficace et la qualité du produit fini peut également diminuer. Répartition médiocre de la chaleur Risque d'un choc thermique à l'entrée du four.	TI (indicateur de température)	Examen régulier : Il convient d'examiner périodiquement le registre afin de déceler toute obstruction ou défaillance. Prévoir des systèmes de surveillance continue de la position et des performances du registre afin de repérer toute anomalie ou tout problème. Vérifier visuellement l'emplacement du registre à l'aide de capteurs ou d'indicateurs visuels.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

		Faible débit de gaz combustible vers brûleurs du four F201 (voir nœud N°01)	<p>Baisse de pression au niveau des brûleurs du four 21F1.</p> <p>Diminution de l'intensité de la flamme (perte ou absence de flamme).</p> <p>Diminution du flux de combustible vers les brûleurs.</p> <p>Perte de puissance de combustion.</p> <p>Diminution de la température à l'intérieur du four 21F1.</p> <p>Impact négatif sur les performances du four, menant à une mauvaise efficacité énergétique.</p> <p>Qualité médiocre de la combustion.</p>	<p>FT 3 : Transmetteurs de débit.</p> <p>FRC 3 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 3.</p> <p>Détecteur de pression basse de fuel gaz et arrêt automatique du four.</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p> <p>Ronde opérateur.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : alarme en cas de basse température de sortie de produit.</p>	<p>Prévoir un programme de maintenance préventive des vannes PCV3 / FCV3.</p> <p>Pour signaler tout changement d'état de la vanne, il est également préférable de mettre en place des alarmes et des alertes visuelles ou sonores dans la salle de contrôle. À titre d'exemple, si la vanne est bloquée en position fermée/ouverte, une alarme signalera instantanément le problème aux opérateurs via un capteur qui peut être raccordé à un système de contrôle qui indique en temps réel l'état de la vanne sur l'écran de contrôle.</p> <p>Se reporter aux actions " Moins de débit " Nœud N°01.</p>
	Haute Température	Débit important de gaz combustible vers les	Flamme intense susceptible de provoquer	FT 3 : Transmetteurs de débit	Etudier l'installation de TI (indicateurs de température) placés dans tous les tubes du four 21F1 (64 tubes) afin de suivre de manière

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

		<p>brûleurs du four 21F1 (voir nœud N°01)</p>	<p>une surchauffe des tubes du four.</p> <p>Défavoriser la réaction de combustion.</p> <p>Perte de confinement du BRA dans le four 21-F1 risque de départ d'incendie dans le four.</p> <p>Augmentation importante de température et de pression risquant d'entraîner une explosion ou une rupture de la chambre de combustion</p> <p>Fragilisation des tubes et risque de dépasser la température de design des tubes dans les fours (fissuration).</p> <p>Efficacité énergétique réduite : Un débit de combustible trop élevé et non régulé fait que l'unité consomme plus de combustible que nécessaire, ce qui peut entraîner une inefficacité énergétique. Cela a pour</p>	<p>FRC 3 : Contrôleur de débit pour commander la vanne FCV 3</p> <p>TI des tubes de four (indicateur de température)</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par détection avec alarme et intervention de l'opérateur : alarme en cas de haute température de peau (niveau haut et très haut) et alarme en cas de DeltaP entre sommet et bas du four trop important dans le four et alarme de pression haute.</p> <p>Fonction de sécurité réalisée par automate de sécurité : Arrêt four en cas de niveau très haut de la température en sortie four (440°C)</p> <p>Procédure de maintenance Préventive.</p> <p>Ronde opérateur.</p>	<p>efficace le phénomène de surchauffe dans le four.</p>
--	--	---	--	---	--

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

			effet d'augmenter les dépenses d'exploitation.		
--	--	--	--	--	--

VI.4.2.2. Résultats retenus selon les méthodes HAZOP et AMDEC

Chaque composant du système a fait l'objet d'une analyse des modes de défaillance et de leurs effets et de leurs criticité (AMDEC) afin de déterminer ses modes de défaillance et d'identifier les composants au sujet desquels une étude de sûreté de fonctionnement approfondie sera menée. Parallèlement, l'efficacité de la rénovation du système contribue également à la réduction des risques relatifs à un certain composant à l'origine de l'accident. De plus, l'analyse HAZOP a permis d'identifier des déviations potentielles dans plusieurs sections du four 21F1 et suggérer une série de recommandations pour assurer la sécurité du four en éliminant ou en limitant certains risques afin de trouver un compromis entre la production et la sécurité ("Safe-Production"). Selon l'analyse HAZOP, plusieurs éléments possibles pourraient être à l'origine du mauvais fonctionnement du four 21F1.

Plusieurs événements indésirables se produisent au niveau du four et de l'unité de distillation sous vide qui pourraient conduire à plusieurs scénarios d'accident. Il s'agit de scénarios ayant un taux de gravité très élevé, survenu par des événements déclencheurs. Parmi les scénarios retenus, les suivants ont été identifiés :

- Colmatage ou l'obstruction des tubes en raison de l'accumulation de dépôts ou d'encrassement peut endommager le serpentin et provoquer un incendie et l'arrêt du four ainsi que l'unité. En outre, les parois extérieures des tubes peuvent se déformer et s'écailler en raison d'une exposition prolongée à des températures élevées, ce qui limite leur intégrité et leur capacité de transfert de chaleur.
- Perte de confinement du BRA : Dans ce cas, il peut se former un nuage gazeux et atmosphérique extrêmement dangereux. Cette situation pourrait conduire à une explosion brutale (UVCE - Unconfined Vapour Cloud Explosion) comme à un incendie, de type " feu de nappe " ou " feu de jet "
- Présence d'une atmosphère explosive ATEX dans la chambre de combustion du four 2F1 en raison d'une combustion incomplète causée par une surpression dans le four 21F1, possibilité d'une explosion confinée.
- Retour de flamme : ce phénomène peut se produire quand la flamme se propage dans la direction opposée de la chambre de combustion à l'entrée du brûleur.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Pour chaque situation accidentelle, les fonctions de sécurité nécessaires pour empêcher la survenance d'un accident grave ou pour en limiter les conséquences ont été identifiées selon les deux méthodes accompagnées par les travaux de rénovation réalisés.

Les résultats de l'étude AMDEC, présentés dans les figures VI.16 et VI.17, confirment l'efficacité des travaux de rénovation. La matrice de criticité produite par la première étape de l'évaluation des risques avant réduction est présentée ci-dessous (figure VI.16). Le tableau de l'AMDEC et les deux rapports d'accident sont mis en évidence dans cette matrice. En effet, le vieillissement du four dû à des années de service ininterrompu ainsi que d'autres éléments qui ont affecté son fonctionnement.

Une évaluation des risques a été réalisée après la rénovation (figures VI.17), en tenant compte des précautions prises. Cette évaluation actualisée a montré que la gravité potentielle des dangers avait diminué. Les résultats démontrent les avantages considérables de la rénovation en réduisant la possibilité d'accidents et en garantissant un fonctionnement sûr et fiable du four.

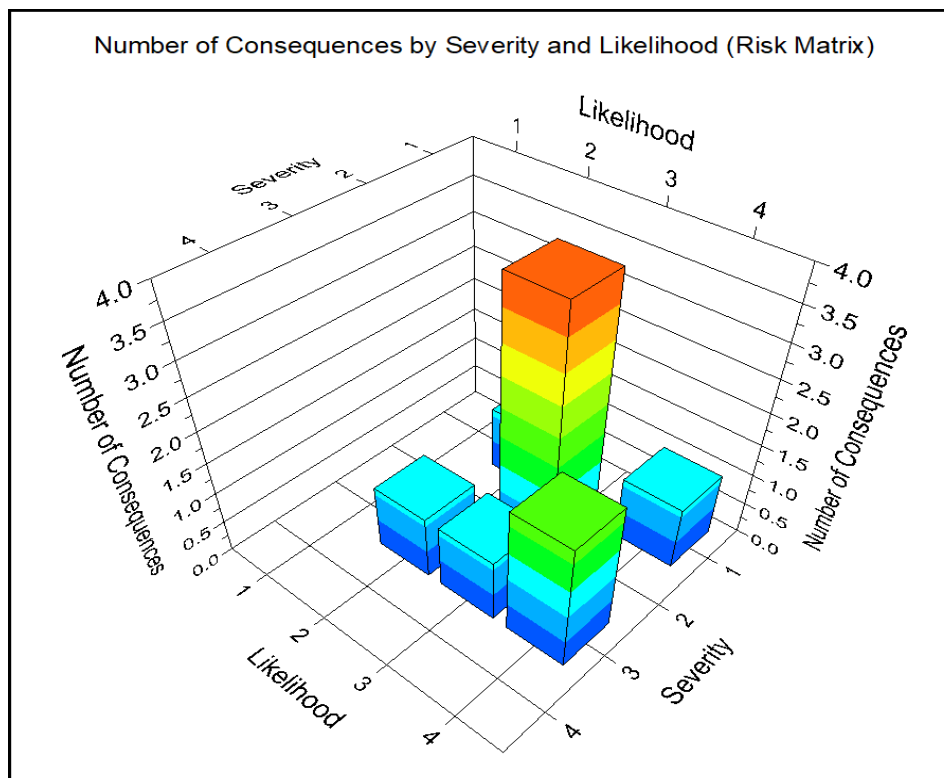


Figure VI.16. Evaluation des risques avant réduction selon la méthode AMDEC

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

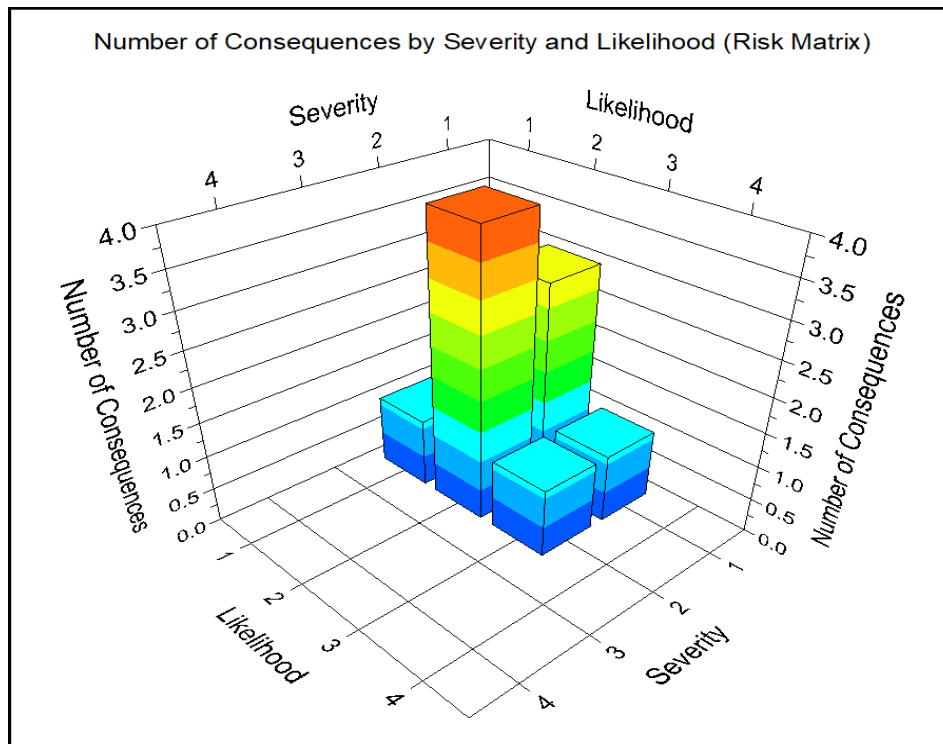


Figure VI.17. Évaluation des risques après réduction suite aux travaux de rénovation effectués

VI.4.3. Données recueillies pour l'étude de fiabilité du four

Le tableau VI.7 présente les données d'événement de base requises pour le présent travail (taux de défaillance) choisis suivant les modes de défaillance des composants du four issus de la base de données OREDA [98] et les données provenant des avis des experts du site, classés suivant les modèles de fiabilité spécifiques aux composants qui feront l'objet d'une étude dans la partie suivante.

**Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas
fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique**

Tableau VI.7. Données relatives aux composants du four

Noeud	Composant	Modèle	Paramètres (λ, γ)	U (t=7860h)
N1	Manque de contrôle opérationnel (erreur humaine)	constant	$\gamma = 2,00E-06$	2,00E-06
N2	Déformation des tubes	constant	$\gamma = 4,08E-05$	4,08E-05
N3	Une forte oxydation des parois extérieures des tubes	constant	$\gamma = 1,50E-04$	1,50E-04
N4	Formation une couche de coke sur les parois internes des tubes	constant	$\gamma = 1,50E-04$	1,50E-04
N5	Détérioration de l'indicateur de température	Exponentiel	$\lambda = 9,37E-06$	7,88E-03
N6	Fuite importante dans la conduite de gaz combustible	Exponentiel	$\lambda = 1,10E-06$	8,61E-03
N7	Colmatage des becs des brûleurs	constant	$\gamma = 4,75E-04$	4,75E-04
N8	Vanne FCV 3 bloquée en position partiellement fermée	Exponentiel	$\lambda = 3,50E-05$	2,41E-01
N9	Détérioration de l'indicateur du débit de gaz combustible	Exponentiel	$\lambda = 3,45E-05$	2,48E-01
N10	Décharge électrique (orage)	Constant	$\gamma = 1E-05$	1,00E-05
N11	Vibrations (vent)	Constant	$\gamma = 1E-05$	1,00E-05
N12	Accumulation de fumée dans la chambre de combustion	Exponentiel	$\lambda = 3,86 E-05$	2,87E-01
N13	Analyseur d'oxygène endommagé	constant	$\gamma = 6,45E-06$	6,45e-06
N14	Déprimomètre défectueux	constant	$\gamma = 6,45E-06$	6,45e-06
N15	Défaillance de l'opacimètre	constant	$\gamma = 2,05E-06$	2,05E-06
N16	Déformation du dumper	Constant	$\gamma = 2,70E-04$	3,00E-04
N17	Vanne FCV 3 bloquée en position ouverte	Exponentiel	$\lambda = 3,50E-05$	2,41E-01
N18	Dysfonctionnement du PIC	Exponentiel	$\lambda = 5,71E-05$	3,62E-01
N19	Dysfonctionnement de FRC 3	Exponentiel	$\lambda = 1,32E-06$	1,03E-02
N20	Vanne FCV 1 de la charge (ligne1) bloquée en position ouverte (défaillance mécanique, une obstruction ou l'encrassement)	Exponentiel	$\lambda = 5,40E-07$	4,24E-03
N21	Défaut au niveau de la commande de la vanne FRC 1	Exponentiel	$\lambda = 5,40E-07$	4,24E-03

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

N22	Vanne FCV 2 de la charge (ligne 2) bloquée en position ouverte (défaillance mécanique, une obstruction ou l'encrassement)	Exponentiel	$\lambda = 5,40E-07$	4,24E-03
N23	Défaut au niveau de la commande de la vanne FRC 2	Exponentiel	$\lambda = 5,40E-07$	4,24E-03

VI.4.4. Elaboration de l'arbre de défaillance

Une analyse préliminaire a été réalisée à l'aide des méthodes HAZOP et AMDEC pour décrire la situation à l'origine de l'accident. Les résultats obtenus sont cohérents avec le modèle suivi par la méthode de l'arbre des défaillances, laquelle propose une étude qualitative et quantitative de l'incendie du four. Le système est divisé en cinq sous-systèmes principaux qui représentent les événements intermédiaires de la situation critique de manière à faciliter la représentation et la clarification, à savoir : l'augmentation de la température, retour de flamme à l'entrée du brûleur, causes externes, fuite de la charge BRA et le dégagement d'une fumée dense par la cheminée.

Conformément à la littérature présentée au §4.4.3 et suivant le tableau VI.7, la structure de l'arbre de défaillance a été développée comme indiqué dans la figure VI.18.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

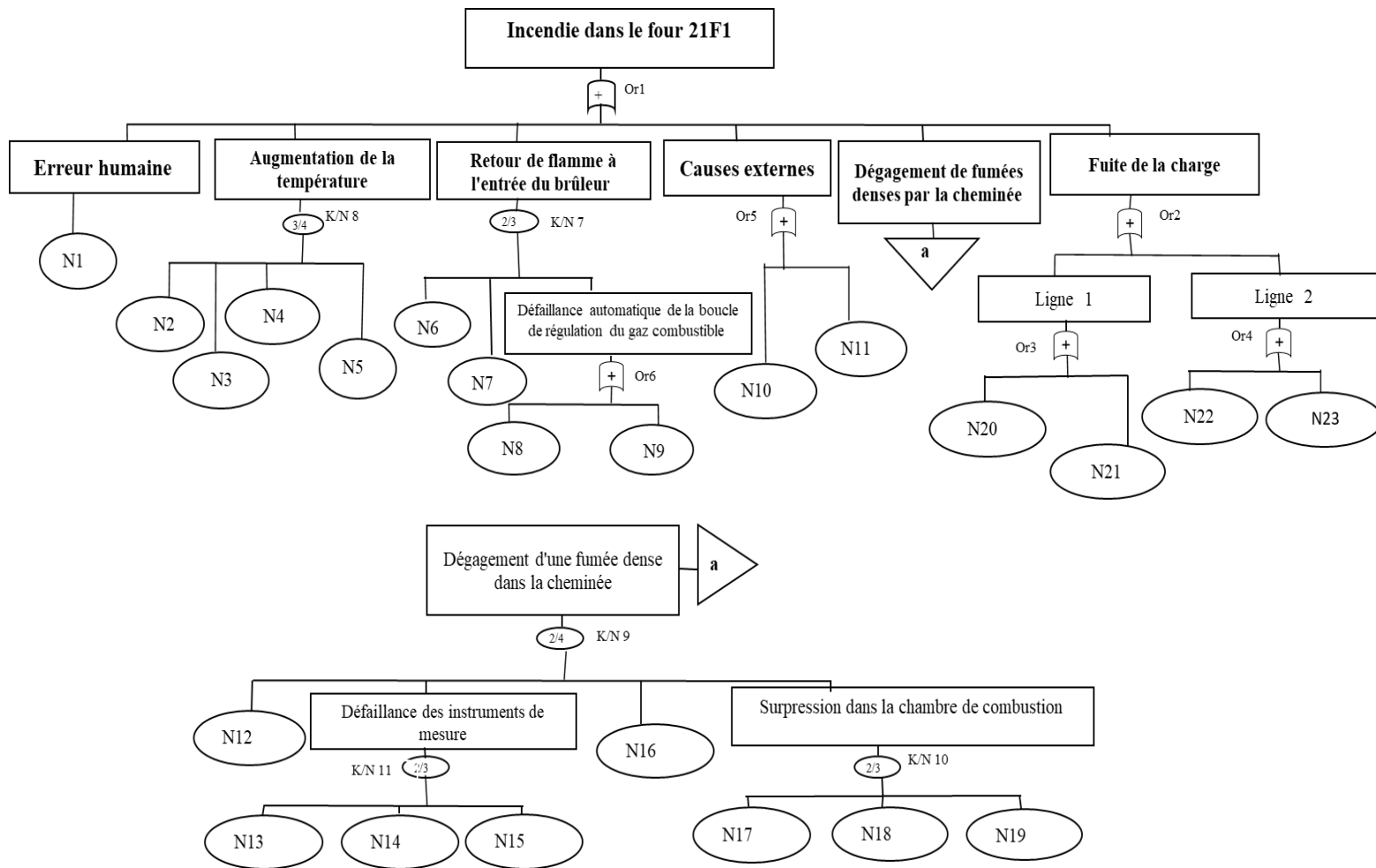


Figure VI.18. Structure de l'arbre de défaillance pour présenter l'incendie du four avec l'extension de l'événement intermédiaire (a), où les événements de base sont mentionnés dans le tableau VI.7

Une durée de $t = 7\ 860$ heures a été retenue pour évaluer l'indisponibilité du système, c'est-à-dire le temps écoulé entre la survenue de l'accident initial, le début de la remise en état de l'équipement et de sa remise en service. Cette durée a été choisie de manière à pouvoir comparer les performances du système dans trois cas différents : cas de design, cas de défaillance et cas de rénovation.

Tout d'abord, les mesures de fiabilité du système ainsi que la probabilité d'indisponibilité ont été évaluées selon le cas de "design". Ces résultats fournissent une évaluation de la performance du système dans les conditions idéales. L'événement central a une probabilité de 0,0473 ce qui contribue à l'indisponibilité du système. En outre,

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

l'estimation de la fiabilité est de 95,27 %, ce qui montre que le système est conçu pour fonctionner de manière satisfaisante et qu'il est généralement fiable. Il est essentiel de se rappeler que cette évaluation repose sur les données précises utilisées dans la présente étude, qui ont été recueillies de la manière la plus idéale et la plus optimale comme les données concernent les composants du four, autrement dit son caractère neuf.

Le calcul des probabilités des événements de base, des facteurs d'importance probabiliste FIPs (Birnbaum et critique), ainsi que les probabilités des événements intermédiaires et l'événement central, a été effectué au moyen du logiciel Arbre-Analyste. Les tableaux VI.7, VI.8 et VI.10 résument ces résultats et fournissent un aperçu quantitatif des probabilités relatives à chaque événement.

Tableau VI.8. Portes logiques pour chaque événement intermédiaire et sous-système

Noeud	Nom	U (t=7860 h)
Or1	Incendie dans le four 21F1	0,0473
Or2	Fuite de la charge	1,68E-02
Or3	Ligne 1	8,45E-03
Or4	Ligne 2	8,45E-03
Or5	Causes externes	2,00E-05
Or6	Défaillance automatique de la boucle de régulation du gaz combustible	4,21E-01
KooN7	Retour de flamme à l'entrée du brûleur	4,34E-03
KooN8	Augmentation de la température	2,74E-09
KooN9	Dégagement d'une fumée dense dans la cheminée	2,68E-02
KooN10	Surpression dans la chambre de combustion	9,26E-02
KooN11	Défaillance des instruments de mesure	6,80E-11

Selon le modèle structurel présenté par de l'ADD de la figure VI.18, et par le biais de l'algèbre de Boole, les coupes minimales sont les suivantes :

Incendie dans le four 21F1 est l'événement centrale désigné par T.

Les événements intermédiaires sont définis de la manière suivante :

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

E_1 (Manque de contrôle opérationnel (erreur humaine)),

E_2 (Fuite de charge BRA) ,

E_3 (Causes externes) ,

E_4 (Retour de flamme à l'entrée du brûleur),

E_5 (Augmentation de la température) ,

E_6 (Dégagement de fumée dense par la cheminée),

B (Ligne 1),

C (Ligne 2),

D (Surpression dans la chambre de combustion),

H (Défaillance des instruments de mesure),

F (Défaillance automatique de la boucle de régulation du gaz combustible),

À partir des équations (IV-2) et (IV-3), la formule générale du système se décline comme suit :

$$T = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5 \cup E_6$$

Avec :

- $E_1 = N1$
-
- $E_2 = A \cup B = (N21 \cup N20) \cup (N22 \cup N23)$
- $E_3 = N10 \cup N11$
- $E_4 = (N6 \cap N7) \cup (N6 \cap F) \cup (N7 \cap F) = (N6 \cap N7) \cup (N6 \cap (N8 \cup N9)) \cup (N7 \cap (N8 \cup N9))$
- $E_5 = (N2 \cap N3 \cap N4) \cup (N2 \cap N3 \cap N5) \cup (N3 \cap N4 \cap N5)$
- $E_6 = (N12 \cap H) \cup (N12 \cap N16) \cup (N12 \cap D) \cup (H \cap N16) \cup (H \cap D) \cup (N16 \cap D)$

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

$$\begin{aligned}
 &= (N12 \cap ((N13 \cap N14) \cup (N13 \cap N15) \cup (N14 \cap N15))) \cup (N12 \\
 &\quad \cap N16) \cup (N12 \cap ((N17 \cap N18) \cup (N17 \cap N19) \cup (N19 \cap N118))) \\
 &\quad \cup (((N13 \cap N14) \cup (N13 \cap N15) \cup (N14 \cap N15)) \cap N16) \cup (((N13 \\
 &\quad \cap N14) \cup (N13 \cap N15) \cup (N14 \cap N15)) \cap ((N13 \cap N14) \cup (N13 \\
 &\quad \cap N15) \cup (N14 \cap N15))) \cup (N16 \cap ((N13 \cap N14) \cup (N13 \cap N15) \cup (N14 \\
 &\quad \cap N15)))
 \end{aligned}$$

L'équation générale de la logique booléenne répondant à l'étude de scénarios d'incendies du four 21F1 est donnée par la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 T = & N1 \cup ((N21 \cup N20) \cup (N22 \cup N23)) \cup (N10 \cup N11) \cup ((N6 \cap N7) \cup \\
 & (N6 \cap (N8 \cup N9)) \cup (N7 \cap (N8 \cup N9))) \cup ((N2 \cap N3 \cap N4) \cup (N2 \cap N3 \cap N5) \cup \\
 & (N3 \cap N4 \cap N5)) \cup \left((N12 \cap ((N13 \cap N14) \cup (N13 \cap N15) \cup (N14 \cap N15))) \cup \right. \\
 & \left. (N12 \cap ((N17 \cap N18) \cup (N17 \cap N19) \cup (N19 \cap N118))) \cup \left(((N13 \cap N14) \cup \right. \right. \\
 & \left. \left. (N13 \cap N15) \cup (N14 \cap N15)) \cap N16 \right) \cup \left(((N13 \cap N14) \cup (N13 \cap N15) \cup \right. \right. \\
 & \left. \left. (N14 \cap N15)) \cap ((N13 \cap N14) \cup (N13 \cap N15) \cup (N14 \cap N15)) \right) \cup \left(N16 \cap \right. \\
 & \left. \left. ((N13 \cap N14) \cup (N13 \cap N15) \cup (N14 \cap N15)) \right) \right).
 \end{aligned}$$

L'indépendance de chaque événement d'entrée contribue à la complexité de la structure de l'arbre de défaillance. Pour cette raison, l'application des principes booléens précédemment énoncés au problème est ardue. Cependant, cette étape a permis d'illustrer la manière dont les règles booléennes peuvent être utilisées pour décrire une équation globale d'un système. Pour faciliter l'évaluation de l'arbre de défaillance et pour déterminer les coupes minimales, le logiciel Arbre-Analyst a été utilisé, elle comporte 38 coupes minimales dont la majorité sont d'ordre 3 avec 7 coupes d'ordre 1 qui contribuent à 89,54% de l'indisponibilité du système Tableau VI.9, ainsi que d'autres composants impliqués dans d'autres coupes de différents ordres (niveaux).

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Ces résultats vont être clairement détaillés lors de calculs thermiques dans lesquels les éléments et les composants qui ont contribué à l'indisponibilité du four dans le cas défaillant vont être mis en évidence.

Tableau VI.9. Nombre de coupes minimales et leurs influences sur l'événement principal avec exemple d'indisponibilité pour chaque ordre à $t = 7860 h$

Ordre	Nombre	Probabilité de produits (%)	Exemples	
			Produits	Probabilité de produits
1	7	89,54	N12	4,23541E-02
2	6	10,4	N6, N8	4,9192E-03
3	16	0,05	N16,N17,N18	2,34815E-05
4	9	Moins de 0,001	N13,N14,N17,N18	3,61811E-12

Tableau VI.10. Comparaison des FIPs obtenus par l'ADD et le RB avec l'indisponibilité de chaque élément dans le cas de design suite aux choix des composants ayant un impact important sur le système dans le cas de défaillance

Four 21F1					
Cas de design					
Noeud	U_{design}	RB		ADD	
		$I_{Y_i}^{Pr}$	$I_{Y_i}^{Cr}$	$I_{Y_i}^{Pr}$	$I_{Y_i}^{Cr}$
N4	1,50E-04	1,50E-05	4,74E-08	1,50E-05	4,76E-08
N5	7,88E-03	3,56E-08	5,93E-09	3,57E-08	5,95E-09
N6	8,61E-03	4,98E-04	9,07E-05	5,00E-04	9,10E-05
N7	4,75E-04	4,84E-04	4,86E-05	4,86E-04	4,88E-05
N12	2,87E-01	9,31E-02	5,65E-01	9,35E-02	5,67E-01
N16	3,00E-04	3,79E-05	2,40E-07	3,80E-05	2,41E-07

VI.4.5. Étude par un réseau bayésien du scénario de l'incendie du four 21F1

VI.4.5.1. Structure du RB issu de l'ADD

A partir de l'arbre de défaillance présenté dans la figure VI.18 et conformément à l'algorithme décrit en §5.3.2.1, le réseau bayésien fut développé afin d'analyser le système selon un meilleur modèle probabiliste, comme le montre la figure VI.19. Le modèle résultant présente le système du cas de design.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tous les éléments des tableaux VI.7 et VI.8 qui correspondent au modèle de l'AdD sont convertis en nœuds racines et nœuds intermédiaires. Les nœuds du système sont définis avec des états binaires "true" et "false". les probabilités d'occurrence des événements de base restent les mêmes selon les deux méthodes. Lorsque les paramètres de performance de l'équipement seront calculés, la probabilité estimée d'indisponibilité des événements de base pour les cas de défaillance et après rénovation sera déterminée par le RB. Ces paramètres seront abordés plus en détail dans la section suivante.

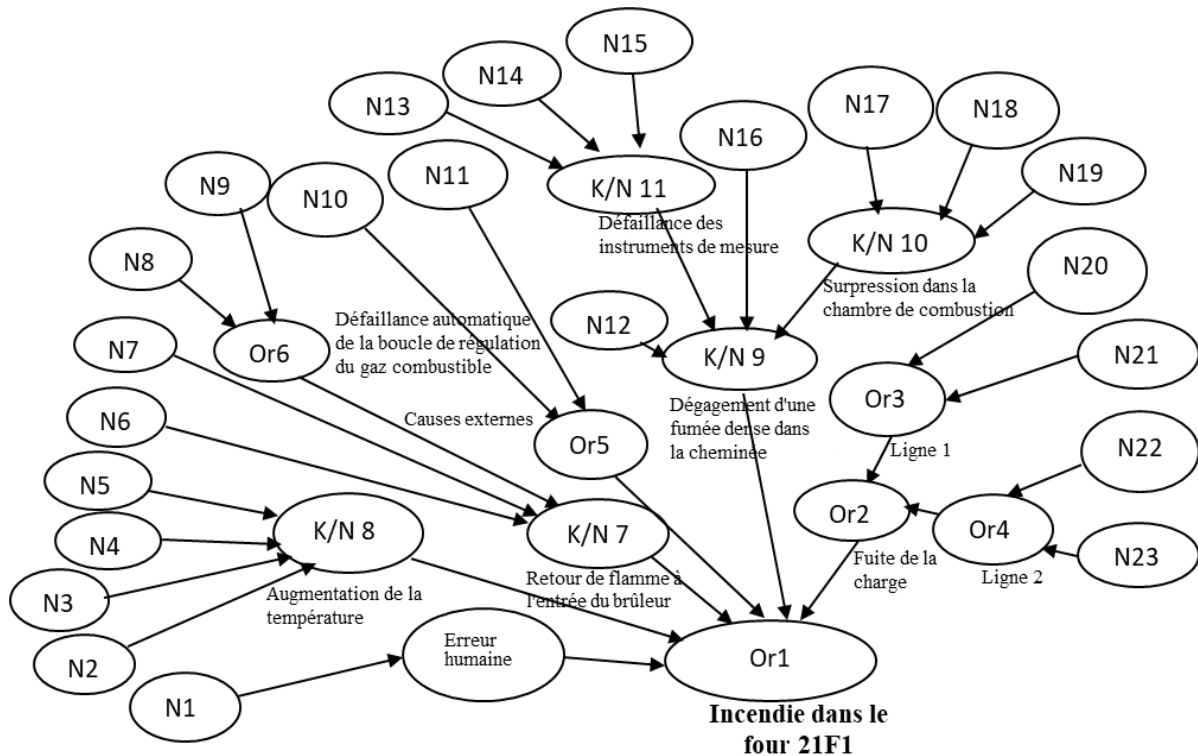


Figure VI.19. Structure du réseau bayésien pour un scénario d'incendie du four 21F1, où les nœuds racines sont listés dans le tableau VI.7

VI.5. Application de la méthode de calcul thermique pour déterminer les paramètres de performance du four 21F1

Dans cette étape, un calcul thermique est effectué dans le but de déterminer les paramètres de performance du four, à savoir le rendement, la quantité de chaleur absorbée et le coefficient d'échange global. Le choix de ces trois paramètres s'explique par le fait qu'ils sont importants et pertinents pour l'évaluation de la performance de l'équipement thermique, conformément à ce qui est expliqué en détail dans le chapitre 1. En effet, ces paramètres servent à quantifier et à analyser la performance globale du four.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Les paramètres de performance du four dans trois cas différents : cas design, cas défaillant et cas après rénovation feront l'objet d'une analyse comparative. Cette évaluation est réalisée suite à la rénovation du four et au retubage des serpentins de la charge. Pour chaque cas, les paramètres de performance, notamment le rendement, la quantité de chaleur absorbée et le coefficient global de transfert de chaleur, sont déterminés pour voir si le four fonctionne encore de manière efficace après les travaux de rénovation.

VI.5.1. Détermination du rendement thermique du four 21F1

VI.5.1.1. Étude de cas du design

Selon les calculs de design, les données sont les suivantes :

- ✓ L'excès d'air dans le cas du design est de 20 %.
- ✓ Les débits et la composition du combustible ainsi que les conditions d'exploitation du four sont tirées du manuel opératoire de la raffinerie présenté dans le tableau VI.11.

Dans un premier temps, sur la base des équations stœchiométriques de la combustion des hydrocarbures, qui permettent de déterminer la quantité d'oxygène, et donc l'air nécessaire à la combustion ainsi que la quantité de fumées formées lors de la combustion de 100 Nm³ de combustible, le calcul s'appuie donc sur les réactions chimiques générales décrites ci-dessous :

Notons que la composition de l'air est la suivante N₂=79,1 %, O₂= 20,9 %



Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.11. Caractéristiques de fonctionnement du four 21F1 dans le cas du design

Caractéristique de fuel gaz	Composition	CH₄	11.6
		C₂H₆	16.3
		C₃H₈	2.3
		C₄H₁₀	0.4
		C₅H₁₂	0.1
		C₆H₁₄	0.9
		H₂	68.3
	H₂S	0.1	
		Débit (Nm ³ /h)	805
	PCI (kcal/Nm ³)	6250	
Débit de la charge (Nm³/h)	54		
Température d'entrée (°C)	283		
Température de sortie (°C)	388		
ΔT (°C)	105		
Température de peau (°C)	550 max		
Température des fumées (°C)	440		

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.12. Résultats des calculs pour le cas design

Constituants du combustible	Pourcentages volumiques (molaire) Yi	O ₂ de la combustion (kmol)	Composition des fumées					Constituants du combustible
			CO ₂	H ₂ O	SO ₂	O ₂	N ₂	
CH ₄	11.6	23,2	11,6	23,2	-	-	87,696	CH ₄
C ₂ H ₆	16.3	57,05	32,6	48,9	-	-	215,649	C ₂ H ₆
C ₃ H ₈	2.3	11,5	6,9	9,2	-	-	43,47	C ₃ H ₈
C ₄ H ₁₀	0.4	2,6	1,6	2	-	-	9,828	C ₄ H ₁₀
C ₅ H ₁₂	0.1	0,8	0,5	0,6	-	-	3,024	C ₅ H ₁₂
C ₆ H ₁₄	0.9	8,55	5,4	6,3	-	-	32,31	C ₆ H ₁₄
H ₂	68.3	34,15	0	68,3	-	-	129,087	H ₂
H ₂ S	0.1	0,15	0	0,1	0.1	-	0,567	H ₂ S
TOTAL	100	138	-	-	-	-	-	
O₂ dans l'excès d'air		27.6	58,6	158,6	0.1	27.6	521,631	Total
O₂ dans l'air de combustion		165.6						Pourcentage molaire
N₂ dans l'air de combustion		625,968	6.7 3%	18.21 %	0.01 %	3.17 %	71.88 %	
Volume d'air de combustion pour 100 Nm³ de gaz combustible		791,568	870,868					Volume des fumées pour 100 Nm ³ de gaz combustible

A partir du tableau VI.12 ci-dessus, le volume total d'oxygène est calculé comme suit :

$$V_{O_2 \text{ Total}} = V_{O_2 \text{ Nécessaire}} + V_{O_2 \text{ dans l'excès d'air}} = 138 + 27.6 = 165.6 \text{ Nm}^3$$

volume total de gaz inerte (N₂) est également calculé comme suit :

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Pour 1 mol O₂ \longrightarrow 3.78 N₂

165.6 mol O₂ \longrightarrow $x = 165.6 \times 3.78 = 625.968$

Donc : $V_{N_2 Total} = 625.968 Nm^3$

Volume de l'air nécessaire pour la combustion :

$$V_{air} = V_{O_2 Total} + V_{N_2 Total} = 165.6 + 625.968 = 791.568 Nm^3$$

Pour 100 Nm³ de fuel gaz nécessite 791.568 Nm³ d'air

805 Nm³ de fuel gaz nécessite 6372,122 Nm³ d'air

Par conséquent, le volume d'air nécessaire à la combustion dans les conditions de fonctionnement du four 21F1 dans le cas design est le suivant : $V_{air} = 6372,122 Nm^3$

conformément au chapitre I, section §I.7.1.3, le rendement thermique est donné par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{\text{Quantité de chaleur absorbé par le fluide}}{\text{Quantité de chaleur fourni par la combustion}} \times 100$$

Les quantités de chaleur à l'entrée de l'air et du combustible sont déterminées par les équations (I-9) et (I-11), respectivement. Le tableau VI.11 contient les données nécessaires pour effectuer ce calcul, sachant que la chaleur spécifique de l'air à 20 C° est égale à 0,3125 (kcal/Nm³.C°).

$$Q_{combustible} = 805 \times 6250 = 5031250 Kcal/h$$

$$Q_{air} = 6372,122 \times 0.3125 \times 20 = 39 825,77 Kcal/h$$

$$Q_{entrée, combustion} = 5031250 + 39 825,77 = 5 071 075,77 Kcal/h$$

Par la suite, les pertes de chaleur à travers la paroi réfractaire et les fumées sont présentées à partir des équations (I-12) et (I-13).

$$Q_{paroi} = 5 071 075,77 \times 0.02 = 101 421,52 Kcal/h$$

pour calculer la perte de chaleur à travers les fumées sachant que la température des fumées est égale à 440 °C.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.13. Perte de chaleur par les fumées pour 100 Nm³ de gaz combustible dans le cas de design

Constituants	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂	Total
<i>f_i</i> (Nm ³ /h)	58,6	158,6	521,631	27,6	0,1	-
<i>C_{p_i}</i>	0,4928	0,3975	0,3318	0,3329	0,2400	-
<i>H_i</i> (kcal/Nm ³)	983,09	2146,38	7071,48	312,77	0,82	10514,53081

{ Pour 100 Nm³ de fuel gaz correspond à une quantité de chaleur perdu par les fumées
 10514,531Kcal/h
 805 Nm³fuel correspond à une quantité de chaleur perdu par les fumées 84641,973 Kcal/h

$$Q_{fumées} = 84641,973 \text{ Kcal/h}$$

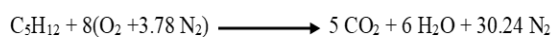
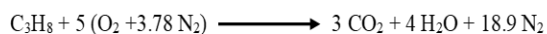
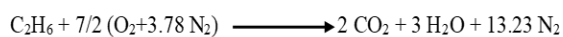
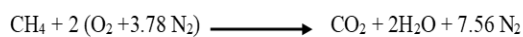
Le rendement thermique est égal pour le cas de design selon l'équation (I-7) ci-dessus :

$$\eta = \frac{5\,071\,075,77 - 101\,421,52 - 84641,973}{5\,071\,075,77} \times 100 = 96.33 \%$$

VI.5.1.2. Étude de cas réel (cas de défaillance)

le calcul se déroule selon les mêmes modalités que dans le cas de design, sur la base des données présentées dans le Tableau VI.14.

Les réactions qui peuvent se produire sont :



Toutes ces réactions ont été utilisées pour déterminer la quantité d'oxygène, et donc d'air, nécessaire à la combustion, ainsi que la quantité de fumée formée lorsque 100 Nm³ de combustible dans le cas de défaillance. Les résultats sont donnés dans le tableau VI.15.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.14. Caractéristiques de fonctionnement du four 21F1 dans le cas de défaillance

Caractéristique de fuel gaz	Composition	CH4	56,95
		C2H6	7,6
		C3H8	3,86
		C4H10	1,07
		C5H12	0,13
		H2	30,39
	Débit (Nm ³ /h)	488	
Débit de la charge (Nm³/h)	42		
Température d'entrée (°C)	256		
Température de sortie (°C)	385		
ΔT (°C)	129		
Température de peau (°C)	545		
Température des fumées (°C)	457		

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.15. Résultats des calculs pour le cas de défaillance

Constituants du combustible	Pourcentages volumiques (molaire) Y_i	O ₂ de la combustion (kmoles)	Composition des fumées				Constituants du combustible
			CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	
CH ₄	56,95	113,9	56,95	113,9	-	430,54	CH ₄
C ₂ H ₆	7,6	26,6	15,2	22,8	-	100,55	C ₂ H ₆
C ₃ H ₈	3,86	19,3	11,58	15,44	-	72,95	C ₃ H ₈
C ₄ H ₁₀	1,07	6,955	4,28	5,35	-	26,29	C ₄ H ₁₀
C ₅ H ₁₂	0,13	1,04	0,65	0,78	-	3,93	C ₅ H ₁₂
H ₂	30,39	15,195	0	30,39	-	57,44	H ₂
TOTAL	100	182,99	-	-	-	-	
O₂ dans l'excès d'air		127,13	88,66	188,66	127,13	691,70	Total
O₂ dans l'air de combustion		310,12					Pourcentage molaire
N₂ dans l'air de combustion		1172,257	05.6 2%	11.97 %	08.06 %	74.35 %	
Volume d'air de combustion pour 100 Nm³ de gaz combustible		1482,379	1576,709				Volume des fumées pour 100 Nm³ de gaz combustible

le volume total d'oxygène est calculé comme suit :

$$V_{O_2 \text{ Total}} = V_{O_2 \text{ Nécessaire}} + V_{O_2 \text{ dans l'excès d'air}} = 182,99 + 127,13 = 310,121 \text{ Nm}^3$$

volume total de gaz inerte (N₂) est également calculé comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Pour 1 mol O}_2 &\longrightarrow 3.78 \text{ N}_2 \\ 310,121 \text{ mol O}_2 &\longrightarrow x = 310,121 \times 3.78 = 1172,257 \end{aligned}$$

Donc : $V_{N_2 \text{ Total}} = 1172,257 \text{ Nm}^3$

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Volume de l'air nécessaire pour la combustion :

$$V_{air} = V_{O_2 Total} + V_{N_2 Total} = 310,12 + 1172,257 = 1482,379 \text{ Nm}^3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour } 100 \text{ Nm}^3 \text{ de fuel gaz nécessite } 1482,379 \text{ Nm}^3 \text{ d'air} \\ 488 \text{ Nm}^3 \text{ de fuel gaz nécessite } 7234,007 \text{ Nm}^3 \text{ d'air} \end{array} \right.$$

Par conséquent, le volume d'air nécessaire à la combustion dans les conditions de fonctionnement du four 21F1 dans le cas de défaillance est le suivant : $V_{air} = 7234,007 \text{ Nm}^3$

Ensuite, les quantités de chaleur à l'entrée de l'air et du carburant sont calculées. Le tableau VI.14 présente les données requises pour mener à bien ce calcul, sachant que la chaleur spécifique de l'air à 20 C° est égale à 0,3125 kcal/Nm³.C°

Dans cette étape, le pouvoir calorifique inférieur du combustible n'est pas donné, il est donc déduit à partir de ses constituants, selon le tableau VI.16.

Tableau VI.16. Pouvoirs calorifiques et pourcentages molaires du gaz combustible

Constituants	Y _i %	PCI _i (kcal/Nm ³)
C ₁ H ₄	56,95	8550
C ₂ H ₆	7,6	15220
C ₃ H ₈	3,86	21800
C ₄ H ₁₀	1,07	28340
C ₅ H ₁₂	0,13	34890
H ₂	30,39	2580
TOTAL	100	8376,46

$$Q_{combustible} = 488 \times 8376,46 = 4087711,98 \text{ Kcal/h}$$

$$Q_{air} = 7234,007 \times 0,3125 \times 20 = 45212,545 \text{ Kcal/h}$$

$$Q_{entrée,combustion} = 4087711,98 + 45212,545 = 4132924,53 \text{ Kcal/h}$$

Les pertes de chaleur à travers la paroi réfractaire et les fumées sont également calculées.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

$$Q_{paroi} = 4132924,53 \times 0.02 = 82658,49 \text{ Kcal/h}$$

Pour calculer la perte de chaleur à travers les fumées, sachant que la température des fumées est égale à 457 °C. Les chaleurs sensibles des gaz de combustion sont exprimées comme dans le cas de design, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau VI.17.

Tableau VI.17. Perte de chaleur par les fumées pour 100 Nm³ de gaz combustible dans le cas de défaillance

Constituants	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	Total
f_i (Nm ³ /h)	88,66	188,66	1172,257	127,13	-
Cp_i (kcal/Nm ³ .°C)	0,4968	0,3994	0,3326	0,3337	-
H_i (kcal/Nm ³)	21589,04	36936,86	191128,19	20019,49	279480,55

{ Pour 100 Nm³ de fuel gaz correspond à une quantité de chaleur perdu par les fumées 279480,55 Kcal/h
 { 488 Nm³ fuel correspond à une quantité de chaleur perdu par les fumées 1363865,095 Kcal/h

$$Q_{fumées} = 1363865,095 \text{ Kcal/h}$$

Le rendement thermique est égal pour le cas de défaillance :

$$\eta = \frac{4132924,53 - 82658,49 - 1363865,095}{4132924,53} \times 100 = 65 \%$$

VI.5.1.3. Étude de cas réel (cas après rénovation)

A partir des données présentées dans le tableau VI.18, les calculs sont réalisés de manière similaire à ceux effectués lors de la défaillance. La composition du combustible étant la même dans ce cas, les résultats obtenus sont également récapitulés dans le tableau VI.17.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.18. Caractéristiques de fonctionnement du four 21F1 dans le cas de la rénovation

Caractéristique de fuel gaz	Composition	CH₄	56,95
		C₂H₆	7,6
		C₃H₈	3,86
		C₄H₁₀	1,07
		C₅H₁₂	0,13
		H₂	30,39
	Débit (Nm ³ /h)	555	
Débit de la charge (Nm³/h)	51		
Température d'entrée (°C)	277		
Température de sortie (°C)	387		
ΔT (°C)	110		
Température de peau (°C)	400		
Température des fumées (°C)	384		

n

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.19. Résultats des calculs pour le cas de rénovation

Constituants du combustible	Pourcentages volumiques (molaire) Y_i	O_2 de la combustion (kmoles)	Composition des fumées				Constituants du combustible
			CO_2	H_2O	O_2	N_2	
CH_4	56,95	113,9	56,95	113,9	-	430,54	CH_4
C_2H_6	7,6	26,6	15,2	22,8	-	100,55	C_2H_6
C_3H_8	3,86	19,3	11,58	15,44	-	72,95	C_3H_8
C_4H_{10}	1,07	6,955	4,28	5,35	-	26,29	C_4H_{10}
C_5H_{12}	0,13	1,04	0,65	0,78	-	3,93	C_5H_{12}
H_2	30,39	15,195	0	30,39	-	57,44	H_2
TOTAL	100	182,99	-	-	-		
O_2 dans l'excès d'air		39,39	88,66	188,6	105,416	691,70	Total
O_2 dans l'air de combustion		222,38	7,65	16,29	3,40	72,66	Pourcentage molaire
N_2 dans l'air de combustion		841,63	%	%	%	%	
Volume d'air de combustion pour 100 Nm^3 de gaz combustible		1064	1158,3321				Volume des fumées pour 100 Nm^3 de gaz combustible

le volume total d'oxygène est calculé comme suit :

$$V_{O_2 Total} = V_{O_2 Necessaire} + V_{O_2 \text{ dans l'excès d'air}} = 39,39 + 182,99 = 222,38 \text{ Nm}^3$$

volume total de gaz inerte (N_2) est également calculé comme suit :

$$\text{Pour 1 mol } O_2 \longrightarrow 3,78 \text{ } N_2$$

$$222,38 \text{ mol } O_2 \longrightarrow x = 222,38 \times 3,78 = 841,63$$

Donc : $V_{N_2 Total} = 841,63 \text{ Nm}^3$

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Volume de l'air nécessaire pour la combustion :

$$V_{air} = V_{O_2 Total} + V_{N_2 Total} = 222,38 + 841,63 = 1064 Nm^3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour } 100 Nm^3 \text{ de fuel gaz nécessite } 1064 Nm^3 \text{ d'air} \\ 555 Nm^3 \text{ de fuel gaz nécessite } 59052,12 Nm^3 \text{ d'air} \end{array} \right.$$

Par conséquent, le volume d'air nécessaire à la combustion dans les conditions de fonctionnement du four 21F1 dans le cas de défaillance est le suivant : $V_{air} = 59052,12 Nm^3$

En suivant les mêmes démarches, les résultats obtenus sont les suivants :

$$Q_{entrée,combustion} = 4\,440\,045,51 Kcal/h$$

$$Q_{paroi} = 88800,9102 Kcal/h$$

$$Q_{fumées} = 897582,5914 Kcal/h$$

Le rendement thermique est égal pour le cas de rénovation :

$$\eta = \frac{4\,440\,045,51 - 88800,9102 - 897582,5914}{4\,440\,045,51} \times 100 = 78 \%$$

VI.5.2. Détermination de la quantité de chaleur absorbée par le fluide à réchauffer (BRA) du four 21F1

Ce paramètre est défini à partir de l'équation (13)

$$Q_{absorbée,design} = 5\,071\,075,77 - 101\,421,52 - 84641,973 = 4\,885\,012,277 Kcal/h$$

$$Q_{absorbée,défaillant} = 4\,132\,924,53 - 82658,49 - 1363865,095 = 2\,686\,400,944 Kcal/h$$

$$Q_{absorbée,renovation} = 4\,440\,045,51 - 88800,9102 - 897582,5914 = 3\,500\,571,209 Kcal/h$$

VI.5.3. Détermination du coefficient global de transfert de chaleur (h) du four 21F1

VI.5.3.1. Etude cas design

Tout d'abord, le nombre de Reynolds (Re), lequel dépend du diamètre du tube, décrit dans l'équation (I-28), est utilisé pour déterminer le régime d'écoulement du fluide à l'intérieur des tubes. Dans cette étude, le four est équipé de tubes de trois diamètres différents. Pour simplifier les calculs, on suppose que tous les tubes ont le même diamètre. Le nombre de

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Reynolds (Re_i) pour chaque tube est ensuite calculé et le résultat est multiplié par le facteur (X) approprié pour chaque type de diamètre, comme le montre le tableau VI.21. Les propriétés du fluide indiquées dans le tableau VI.20 sont également prises en compte, y compris la densité du fluide (BRA) de $906,5 \text{ kg/m}^3$.

Tableau VI.20. Propriétés thermiques de la charge BRA pour les trois cas étudiés

Propriétés thermiques de la charge BRA	Design	Défaillance	Rénovation
Chaleur spécifique C_p (Kcal/m ³ .°C)	1,014	1,567	1.453
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	$3,06 \times 10^{-3}$	$3,06 \times 10^{-3}$	$3,06 \times 10^{-3}$
Conductivité thermique k (W/m.°C)	0.1206	0.1206	0.1206
vitesse linéaire d'écoulement U (m.s)	0.05	0.03	0.045

$$Re_1 = \frac{906.5 \times 0.05 \times 101,6 \times 10^{-3}}{3,06 \times 10^{-3}} = 1504,908$$

$$Re_2 = \frac{906,5 \times 0.05 \times 152,4 \times 10^{-3}}{3,06 \times 10^{-3}} = 2257,363$$

$$Re_3 = \frac{906,5 \times 0,05 \times 203,2 \times 10^{-3}}{3,06 \times 10^{-3}} = 3009,817$$

$$Re_T = \sum Re_i \times X_i$$

$$Re_T = (1504,908 \times 0,867) + (2257,363 \times 0,067) + (3009,817 \times 0,067) = 1657,656$$

Le régime d'écoulement pour le cas de design est un régime laminaire du fait que $Re_t < 2300$

Ensuite, l'estimation du nombre de Prandtl (Pr) est décrite selon l'équation (I-29).

$$Pr = \frac{3,06 \times 10^{-3} \times 1,014}{0,1206} \times 3600 = 92,622$$

Lors de la troisième étape, le nombre de Nusselt (Nu) est calculé par l'équation (I-31) sachant que le régime d'écoulement est laminaire. Leveque a proposé une expression mathématique pour une température constante du tube $T_p = 550^\circ\text{C}$ et une température variable

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

du fluide depuis l'entrée jusqu'à la sortie égale à 283°C et 388 °C, respectivement. Dans cette étude de cas, la relation est définie comme suit :

$$Nu = 1,607 \times \left(\frac{D}{L} \times Pr \times Re\right)^{1/3} \quad (24)$$

La valeur de Nusselt est calculée pour chaque diamètre de tube

$$Nu_1 = 1,607 \times \left(\frac{101,6 \times 10^{-3} \times 92,622 \times 1657,656}{14,114}\right)^{\frac{1}{3}} = 16,615$$

$$Nu_2 = 1,607 \times \left(\frac{152,4 \times 10^{-3} \times 92,622 \times 1657,656}{14,114}\right)^{\frac{1}{3}} = 19,019$$

$$Nu_3 = 1,607 \times \left(\frac{203,2 \times 10^{-3} \times 92,622 \times 1657,656}{14,114}\right)^{\frac{1}{3}} = 20,934$$

ainsi,

$$Nu_T = \sum Nu_i \times X_i$$

$$Nu_T = (16,615 \times 0,867) + (19,019 \times 0,067) + (20,934 \times 0,067) = 17,082$$

En utilisant l'équation (I-33) donnée précédemment, le coefficient de transfert de chaleur (h) est déterminé par la formule ci-dessous selon le diamètre du tube

$$h = \frac{Nu \times \lambda}{D}$$

$$h_1 = \frac{17,082 \times 0,1206}{101,6 \times 10^{-3}} = 20,276 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°c}$$

$$h_2 = \frac{17,082 \times 0,1206}{152,4 \times 10^{-3}} = 13,518 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°c}$$

$$h_3 = \frac{17,082 \times 0,1206}{203,2 \times 10^{-3}} = 10,138 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°c}$$

ainsi,

$$h_T = \sum h_i \times X_i$$

$$h_T = (20,276 \times 0,867) + (13,518 \times 0,067) + (10,138 \times 0,067) = 19,164 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°c}$$

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Dans le cas réel, on procède au même calcul. Le tableau VI.22 et le tableau VI.23 présentent les résultats pour le cas de défaillance et le cas de rénovation, respectivement. En outre, le tableau VI.24 fournit un récapitulatif des résultats du coefficient de transfert de chaleur global (h) pour les trois cas étudiés.

Tableau VI.21. Résultats des nombres de Reynolds, de Nusselt et le coefficient de transfert de chaleur en fonction du diamètre des tubes dans le cas du design

Cas de design			
Diamètre des tubes en (inch)	4	6	8
Diamètre des tubes en (mm)	101,6	152,4	203,2
Nombre de tube	60	60	60
X_i (%)	0,867	0,067	0,067
Re_i	1504,908	2257,363	3009,817
Nu_i	16,615	19,019	20,934
h_i ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	20,276	13,518	10,138

Tableau VI.22. Résultats des nombres de Reynolds, de Nusselt et le coefficient de transfert de chaleur en fonction du diamètre des tubes dans le cas de défaillance

Cas réel : cas de défaillance (en état de service)			
Diamètre des tubes en (inch)	4	6	8
Diamètre des tubes en (mm)	101,6	152,4	203,2
Nombre de tube	60	60	60
X_i (%)	0,867	0,067	0,067
Re_i	902,945	1354,418	1805,89
Nu_i	16,215	18,562	20,43
h_i ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	19,789	13,192	9,894

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.23. Résultats des nombres de Reynolds , de Nusselt et le coefficient de transfert de chaleur en fonction du diamètre des tubes dans le cas de rénovation

Cas réel : cas de rénovation			
Diamètre des tubes en (inch)	4	6	8
Diamètre des tubes en (mm)	101,6	152,4	203,2
Nombre de tube	60	60	60
X_i (%)	0,867	0,067	0,067
Re_i	1354,418	2031,626	2708,835
Nu_i	18,085	20,702	22,786
h_i ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	22,07	14,713	11,035

Tableau VI.24. Synthèse globale des résultats obtenus du coefficient de transfert de chaleur "h" pour les trois cas étudiés

Synthèse globale des résultats du coefficient (h)	Cas de design	Cas de défaillance (en état de service)	Cas de rénovation
Re_T	1657,656	994,594	1491,891
Pr_T	92,622	143,492	132,722
Nu_T	17,082	16,671	18,593
h_T ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	19,164	18,704	20,86

VI.5.4. Comparaison des résultats obtenus entre les trois cas

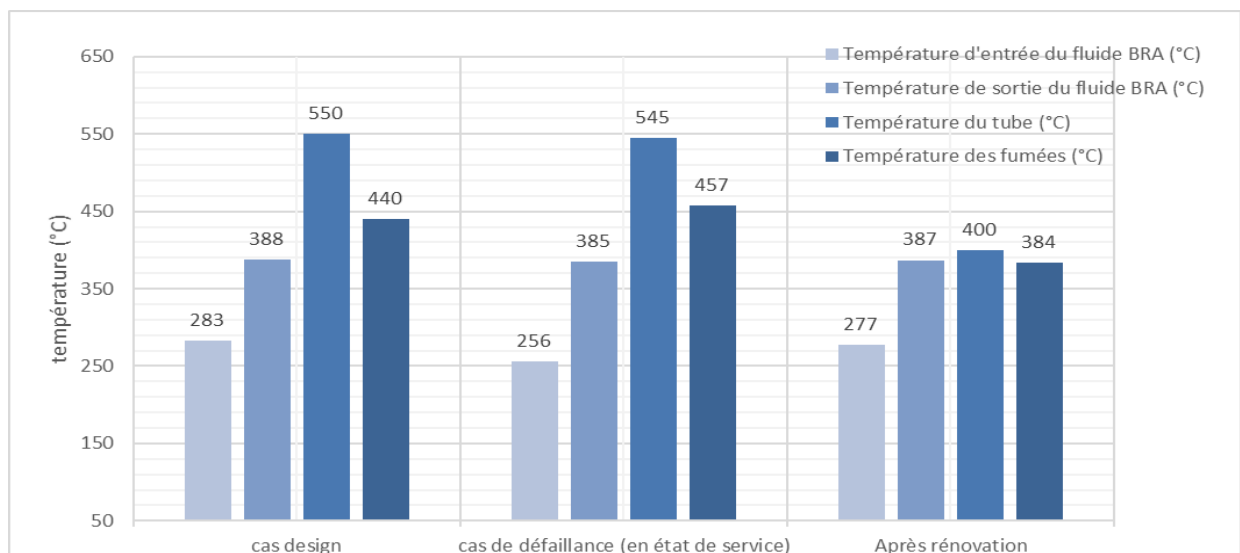


Figure VI.20. Représentation des températures d'entrée et de sortie du fluide, des températures des fumées et de la paroi des tubes selon les trois cas étudiés.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Sur la base des données d'exploitation, il est possible de déceler dans les trois cas étudiés dans la figure VI.20 des variations de température des fumées, des tubes et du fluide BRA. En particulier, la mesure des températures d'entrée et de sortie du fluide révèle également la présence de fluctuations de température. En effet, ces températures sont respectivement de 283°C et de 388°C dans le cas de design.

Ces variations révèlent que le BRA est préchauffé dans une batterie d'échangeurs de chaleur avant d'entrer dans le four lorsque celui-ci présente une anomalie. Cette batterie perd de la chaleur vers l'extérieur en raison de la dégradation de la couche d'isolation thermique, ce qui fait qu'elle n'est plus en mesure de conserver la chaleur. De ce fait, la température d'entrée du fluide est plus basse dans la défaillance, atteignant 256°C, que dans le cas du design. Suite à cette baisse de température, la quantité de combustible consommée pour maintenir la température de sortie nécessaire pour effectuer les étapes ultérieures du procédé a dû augmenter. Après la rénovation, le changement apporté à la couche calorifuge de l'échangeur de chaleur a fait que la température d'entrée est remontée à 277°C.

En outre, une augmentation de 545°C de la température du tube à l'intérieur du four est observée autour du seuil maximum du cas du design, arrivant à la limite de 550°C. Toutefois, les experts préconisent de retenir la température à une valeur maximale sûre de 400 °C, laquelle serait inférieure à la limite prévue dans le cas du design.

Vu que de nouveaux serpentins sont installés pour remplacer les plus anciens, la température du tube est établie à 400 °C après la rénovation. En revanche, la température interne des gaz de combustion à l'intérieur du four, qui était déjà élevée en raison de l'accumulation des gaz de combustion, s'élève à 457 °C. Suite au changement du dumper effectué lors de la rénovation, les fumées peuvent être évacuées vers l'extérieur, ce qui permet une réduction de la température à 384°C. Les ingénieurs de la raffinerie sont parvenus à décrire l'état des tubes après l'augmentation de la température, conformément aux figures précédentes (VI.10, VI.11, VI.12), ainsi que le déroulement des travaux de rénovation, comme le montrent les figures VI.14 et VI.15.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

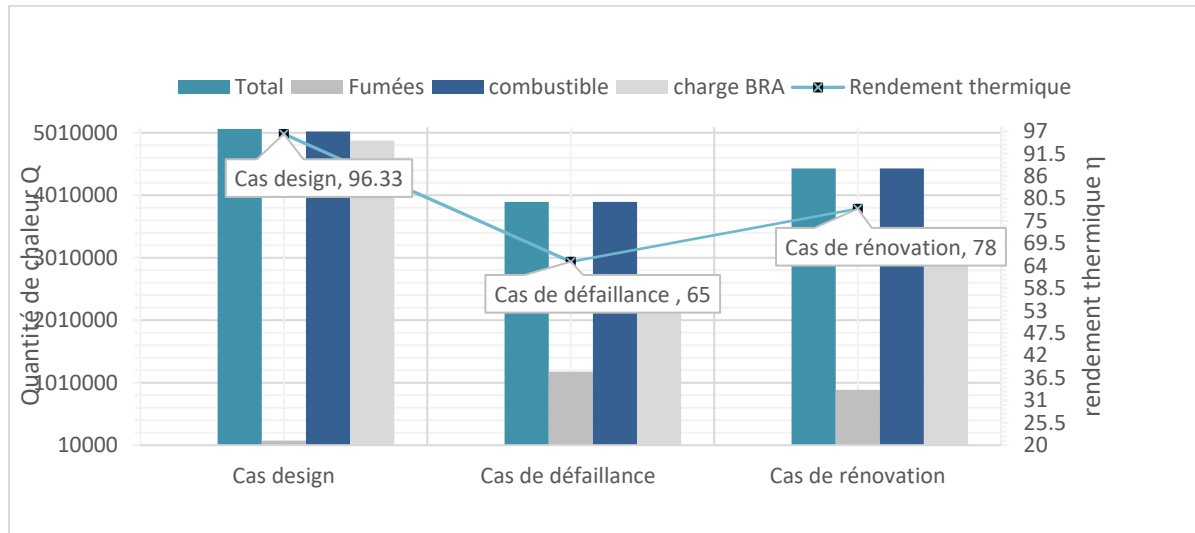


Figure VI.21. Variation du rendement thermique en fonction de la quantité de chaleur selon les trois cas étudiés.

Les résultats du rendement thermique du four sont présentés dans la figure VI.21. Le rendement thermique est fonction des pertes de chaleur par les fumées, de la quantité de chaleur dégagée par le combustible (gaz combustible), de la quantité totale de chaleur nécessaire à la combustion ainsi que la quantité de chaleur absorbée par le fluide BRA dans les trois cas : cas du design, cas de défaillance et cas après rénovation.

Le rendement thermique est estimé à 96,33% dans le cas du design. Cela montre que les pertes de chaleur par les parois et les gaz de combustion sont réellement faibles et négligeables au regard de la chaleur totale générée par la combustion. En outre, la quantité de chaleur fournie par le gaz combustible n'est pas consommée de manière excessive, et la quantité de chaleur absorbée par la charge est également optimale. Ainsi, le produit est chauffé de manière efficace et sûr conformément à ce qui est indiqué dans la figure VI.21.

Le rendement thermique estimé dans le cas de défaillance (en état de service) est d'environ 65 %. Ce pourcentage inférieur à celui du cas du design peut être attribué à un éventail de problèmes liés à la défaillance du système :

- ✓ En raison de l'augmentation des pertes de chaleur par les fumées due à la température plus élevée des fumées et donc le rendement est plus faible.
- ✓ Le fait que la quantité totale de chaleur libérée par la combustion ait diminué d'environ 23 % en cas de défaillance s'explique par la consommation du gaz. Comme indiqué précédemment, lorsque la température d'entrée du fluide est plus basse, il faut davantage

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

de combustible pour atteindre la température nécessaire à la sortie du four. Ceci entraîne un usage plus important de la chaleur fournie par le gaz combustible, ce qui conduit à une réduction de la quantité totale de chaleur nécessaire à la combustion, et donc à une diminution du rendement.

- ✓ L'excès d'air de combustion : qui augmente le débit des fumées et diminue le rendement, car l'excès d'air, inutile à la combustion, est chauffé lors de son passage dans le four jusqu'à la température des fumées, ce qui constitue une perte supplémentaire. Cela a été démontré dans le calcul du rendement, considéré comme étant de 20 % dans le cas du design et de 74,49 % dans le cas de défaillance.
- ✓ La quantité de chaleur absorbée par le BRA est diminuée par rapport au cas du design, ce qui révèle la présence d'un autre facteur qui affecte le rendement, à savoir l'encrassement des tubes et la formation de polluants, qui réduisent l'efficacité du transfert de chaleur vers la charge, ceci sera clairement démontré dans l'étape ultérieure.

Suite à la rénovation, le rendement thermique est augmenté à 78%. Ce résultat est le fait de plusieurs facteurs. Premièrement, la perte de chaleur par les fumées a été limitée grâce à une évacuation efficace des fumées depuis l'installation d'un nouveau dumper. Ensuite, une économie de combustible a pu être réalisée pendant la combustion, ce qui a contribué à une amélioration de la quantité totale de chaleur produite de 12,07 % au regard du cas de défaillance.

Enfin, après la rénovation, la quantité totale de chaleur a augmenté d'environ 12,44 % au regard du cas de conception, ce qui constitue une amélioration vis-à-vis de la diminution de 23 % enregistrée dans le cas de défaillance. Tous ces résultats viennent prouver que le système fonctionne de manière satisfaisante et qu'il est tout à fait fiable après les travaux de rénovation. En outre, la quantité de chaleur absorbée par le produit a augmenté, preuve d'une amélioration du transfert de chaleur suite au changement intégral des serpentins.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

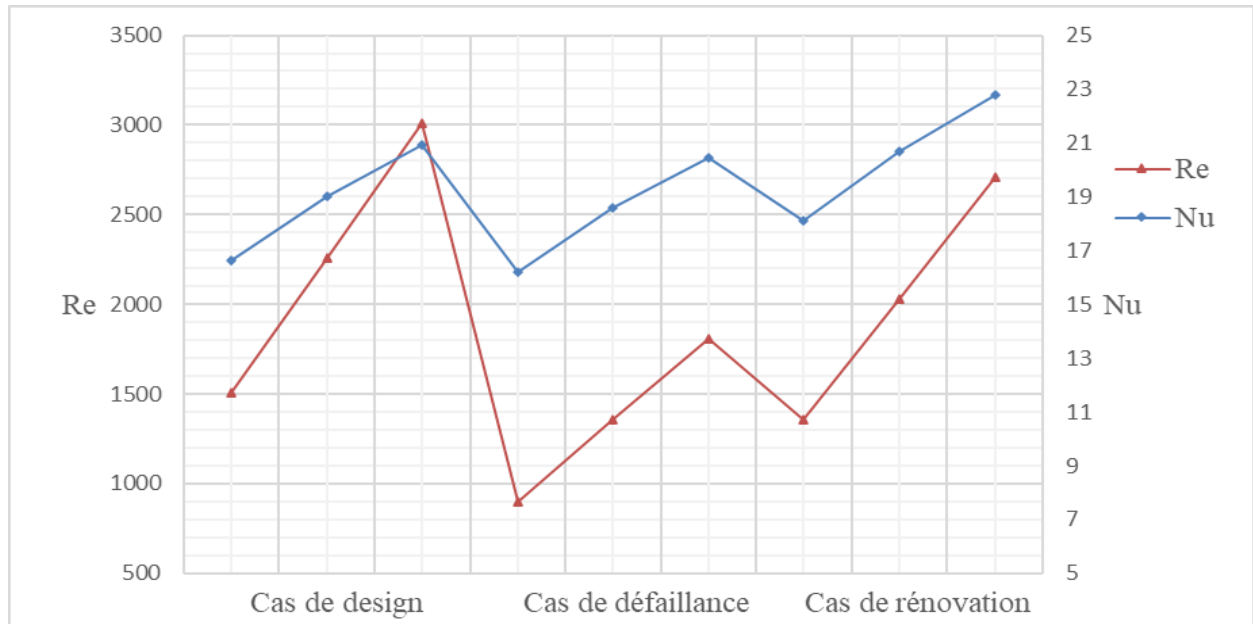


Figure VI.22. Variation des nombres Reynolds et Nusselt en fonction des trois cas étudiés

La figure VI.22 présente une concordance entre les nombres de Reynolds et de Nusselt en fonction des trois cas : design, défaillance et rénovation. Il apparaît clairement que les courbes des deux nombres sont complémentaires et que le nombre de Nusselt évolue en fonction du nombre de Reynolds.

les deux courbes sont réparties selon trois parties représentant respectivement les trois cas étudiés. Le cas design révèle un accroissement du nombre de Reynolds de 1500 à 3000, en raison de l'augmentation de l'écoulement du fluide à travers les tubes de différents diamètres (4 pouces, 6 pouces et 8 pouces). Par conséquent, la valeur de Reynolds est plus élevée, ce qui fait également augmenter le nombre de Nusselt de 16 à 20.

Les résultats indiquent ensuite un déclin du nombre de Reynolds à 900 et du nombre de Nusselt à 16. Cela laisse supposer que le four fonctionne de manière inappropriée, mais qu'il reste opérationnel, ce qui décrit le cas de défaillance. Re et Nu, qui sont compris entre 900 et 1800 et entre 16 et 20, sont en augmentation dans ce cas en raison de l'augmentation de l'écoulement du fluide à travers les tubes de différents diamètres. Les résultats sont cependant toujours inférieurs à ceux du cas de design, soit environ 40 % pour Re et 22,54 % pour Nu.

Après la rénovation, une augmentation du nombre Re (qui passe à 2708) et du nombre Nu (qui passe à 22) apparaît sur la courbe. Cette évolution signifie que le four a été rénové et qu'il est en bon état de fonctionnement. En outre, la valeur Re a augmenté d'environ 33,33 %

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

au regard du cas de défaillance et d'environ 10 % au regard du cas de design. En revanche, la valeur Nu a augmenté d'environ 10,34 % comparé au cas de défaillance.

Il est important de noter que la valeur Nu obtenue suite à la rénovation, soit 22,786, est plus importante que celle obtenue dans le cas du design, laquelle était de 20,934. Cela signifie que durant la rénovation, les experts ont choisi d'utiliser des tubes en acier allié de différentes nuances, de type "chrome-molybdène", au lieu des tubes originaux de 2,25Cr-0,5Mo. Ces nouveaux tubes en acier allié, du type 5Cr-0,5Mo et C-0,5Mo, apportent une meilleure résistance à la déformation et à la corrosion, en particulier dans un environnement caractérisé par des températures élevées.

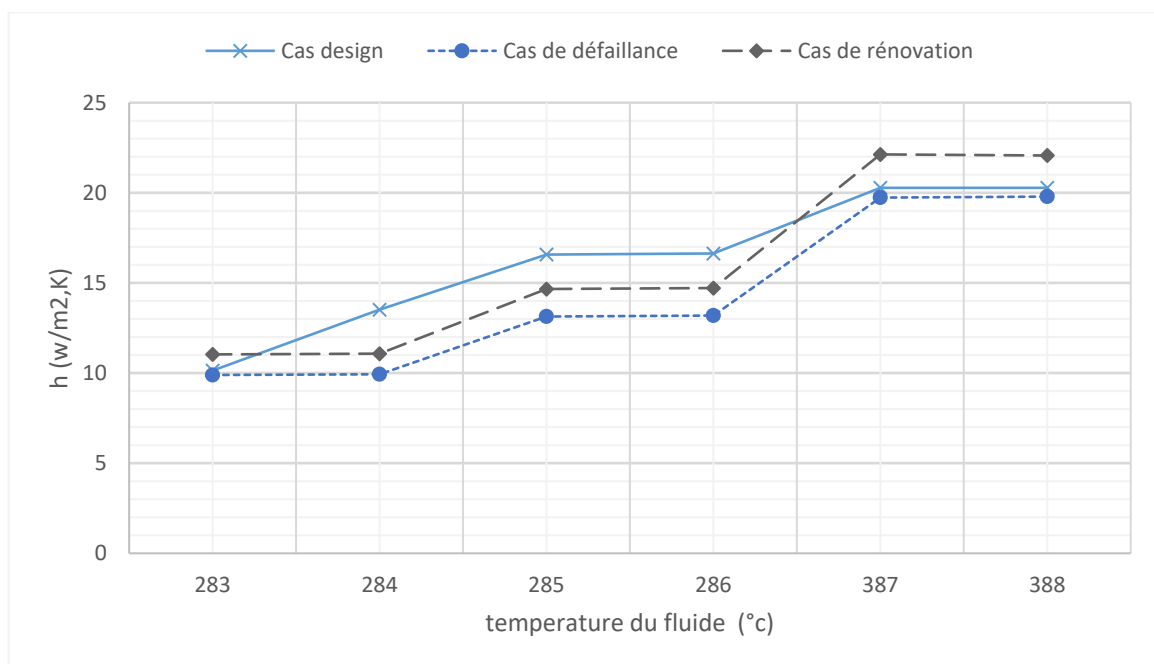


Figure VI.23. Variation du coefficient de transfert de chaleur h en fonction de la température d'entrée et de sortie du fluide pour les trois cas étudiés

La figure VI.23 montre que, dans le cas de la conception, le coefficient de transfert de chaleur, augmente au fur et à mesure que le fluide est chauffé depuis la température d'entrée jusqu'à la température de sortie (285 $^{\circ}C$ à 383 $^{\circ}C$). Le coefficient h atteint dans ce cas une valeur de 20,276 $W/m^2.K$. En outre, les résultats indiquent une augmentation du coefficient h en cas de défaillance, dont la valeur est équivalente à 19,789 $W/m^2.K$, mais qui reste inférieure à celle du design.

Cette constatation souligne que l'échange de chaleur entre le fluide et les parois internes du tube a diminué en raison de la formation d'une couche de coke perceptible sur la surface

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

interne des tubes, dont l'épaisseur varie entre 15 et 20 mm, comme le montre la figure VI.7. Cette formation est liée à une longue exposition des parois du tube à des températures élevées et au vieillissement du métal. Après la rénovation, les résultats obtenus montrent que le coefficient "h" correspondant à la température de sortie du fluide a augmenté de 22,07 $W/m^2.K$. En raison du changement des serpentins, cette valeur dépasse le cas de "design" d'environ 8,13 %.

La durée de vie de l'équipement est un critère important qui pourrait aggraver la diminution des paramètres de performance et augmenter la quantité de polluants. Par conséquent, un décokage du four est recommandée pour éviter les dépôts et l'encrassement des tubes afin de garantir la durabilité du système.

VI.5.5. Simulation de Monté Carlo

Suite à la méthode de calcul du transfert de chaleur, les résultats ont été analysés et interprétés. Par la suite, Le rendement thermique (η), le coefficient de transfert thermique (h) et la quantité de chaleur absorbée par le fluide BRA (Q) correspondant aux trois cas étudiés ont été présentées comme des valeurs probabilistes au moyen d'une simulation par Monte Carlo effectuée à partir d'une fonction de distribution probabiliste de la loi uniforme, comportant une série de 300 itérations, à l'aide du logiciel @risk Palisade. Ensuite, ces paramètres ont été saisis dans le RB pour analyser le système dans ses conditions de défaillance et de rénovation.

Cette méthode génère des valeurs aléatoires pour chaque paramètre sur un intervalle donné à partir de la distribution uniforme, grâce à la simulation de Monte Carlo. En créant un grand nombre d'itérations, nous sommes en mesure d'estimer la plage de valeurs possibles pour chaque paramètre et de déterminer la probabilité selon laquelle, en cas de défaillance ou de rénovation, une valeur convergeant vers la valeur optimale du paramètre sera trouvée. Par conséquent, pour chaque paramètre présent dans chaque cas, une valeur de probabilité correspondante est obtenue. Les résultats sont présentés dans le tableau VI.25.

La loi uniforme est donnée par la formule suivante :

$$F(x) = \frac{x - a}{b - a} \quad a \leq x \leq b$$

Avec :

η suit une distribution uniforme sur l'intervalle [65 - 99,33], qui correspond au rendement minimum et maximum du four.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Cas de défaillance : $65 \leq \eta_{défaillance} \leq 78$

Cas de rénovation : $78 \leq \eta_{rénovation} \leq 99,33$

Q suit une distribution uniforme sur l'intervalle [2, 69E+06 - 4, 89E+06], qui correspond à la quantité de chaleur minimale et maximale du four.

Cas de défaillance : $2,69E+06 \leq Q_{défaillance} \leq 3,50E+06$

Cas de rénovation : $3,50E+06 \leq Q_{rénovation} \leq 4,89E+06$

h suit une distribution uniforme sur l'intervalle [18,704 - 20,86], qui correspond au coefficient de transfert de chaleur minimum et maximum.

Cas de défaillance : $18,704 \leq h_{défaillance} \leq 19,164$

Cas de rénovation : $19,164 \leq h_{rénovation} \leq 20,86$

Tableau VI.25. Probabilité des paramètres de performance pour chaque cas étudié

Probabilité des paramètres de performance	Rendement thermique η	Quantité de chaleur absorbé Q	Coefficient de transfert de chaleur h
Cas de défaillance	0,379	0,3703	0,2134
Cas de rénovation	0,6219	0,6297	0,7866

VI.6. Paramètres de performance du four 21F1 dans le RB

Le modèle bayésien décrit précédemment est adapté au cas de design (Figure VI.19), un extrait de ce modèle est présenté dans la figure VI.24. Dans la présente section, le modèle sera étendu par la prise en compte des paramètres de performance destinés à l'analyse des cas de défaillance et de rénovation.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

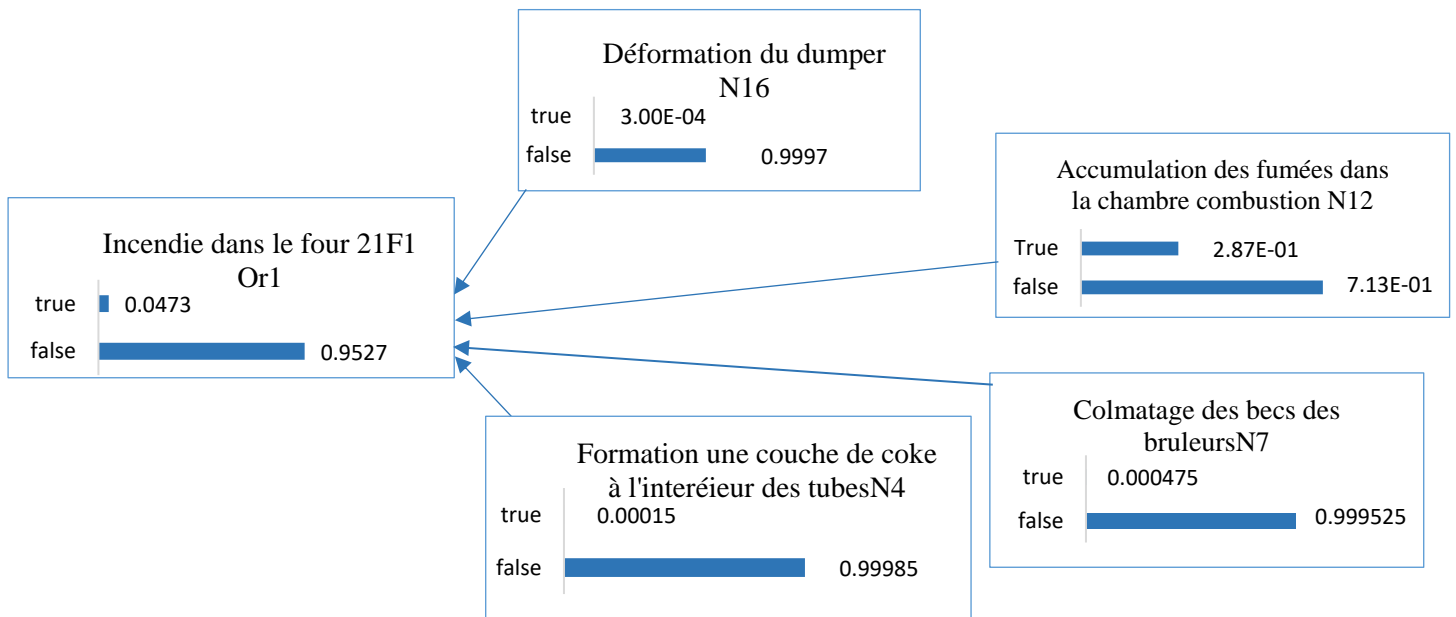
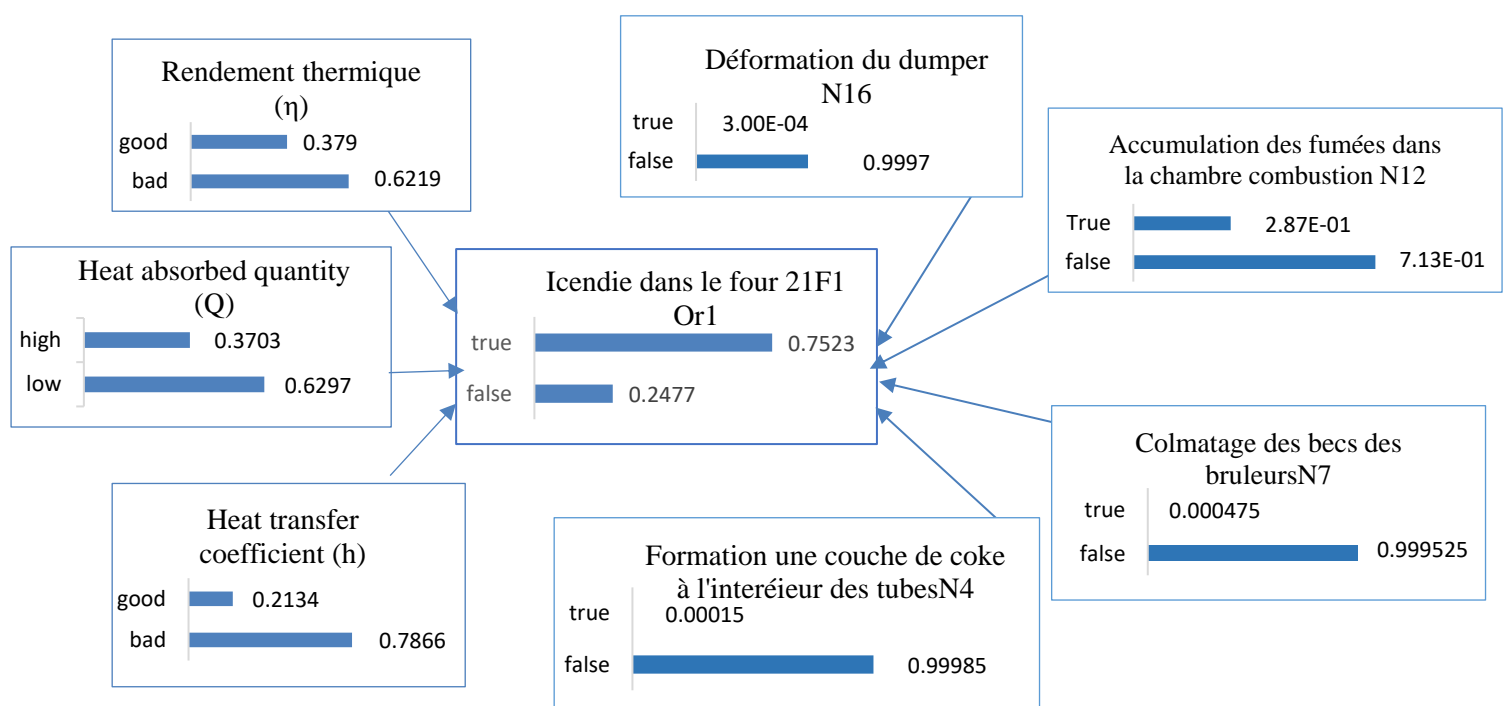


Figure VI.24. Extrait sélectif du modèle bayésien mettant en évidence la structure élaborée dans le cas du design

Le modèle bayésien fourni dans chacun des trois cas n'est qu'une partie de l'ensemble du réseau. Nous avons décidé d'attirer l'attention sur les composants clés de l'étude, qui ont été déterminés par l'analyse du cas de défaillance. Nous avons pu obtenir des informations pertinentes sur le comportement global du système dans diverses conditions en généralisant ces résultats aux cas de rénovation et de design. Par conséquent, nous avons pu mettre en évidence les composants essentiels qui ont un impact important sur la performance du système, tout en simplifiant la présentation.



Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

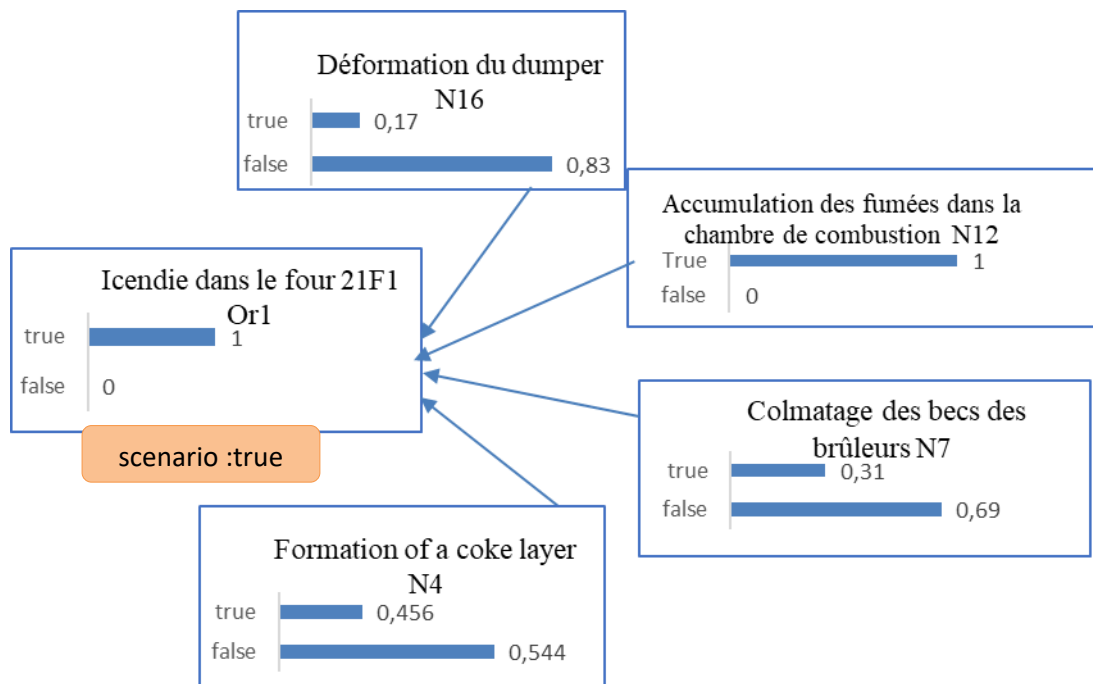
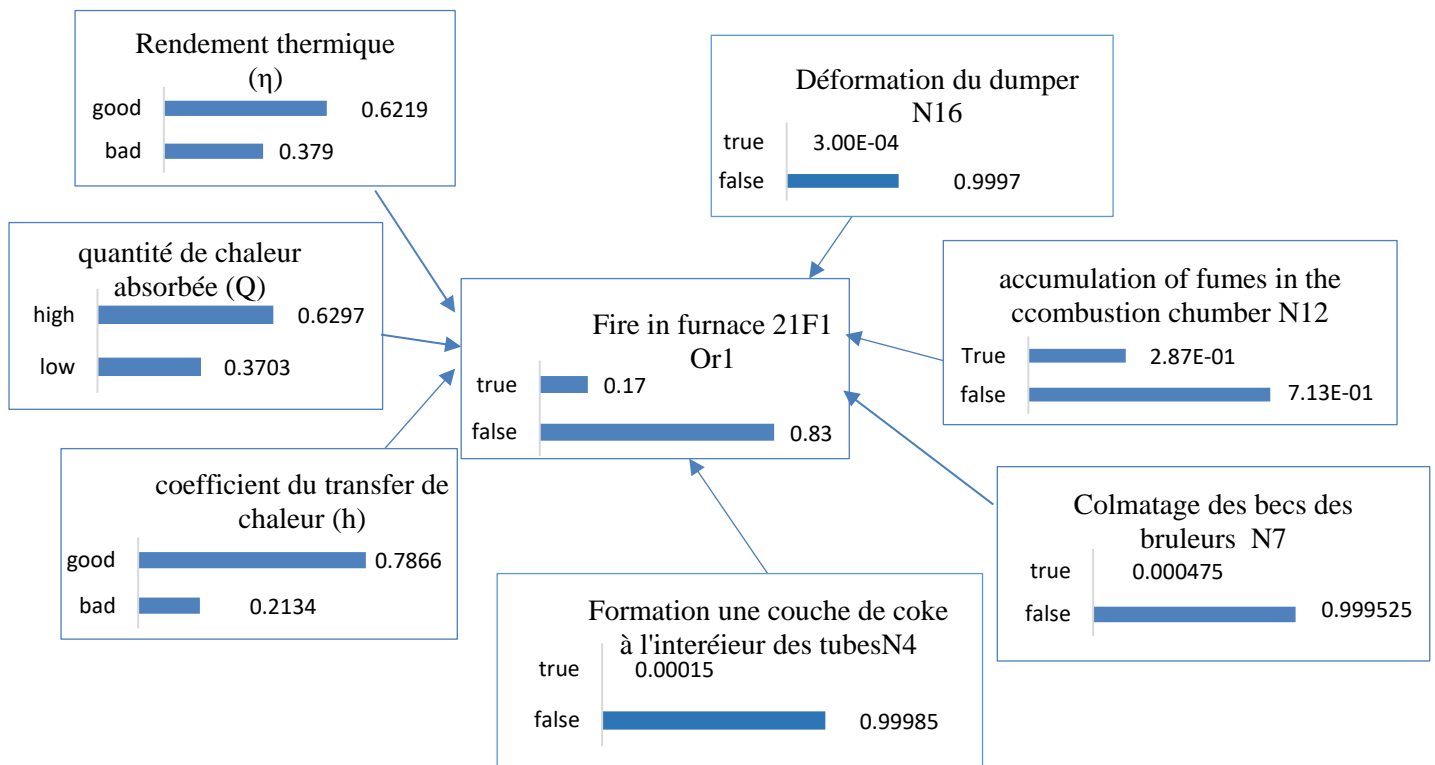


Figure VI.25. Étude de scénarios d'incendie du four 21F1 dans le cas de défaillance en utilisant RB à partir des paramètres de performance obtenus (actualisation des données et l'application de l'inférence bayésienne)



Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

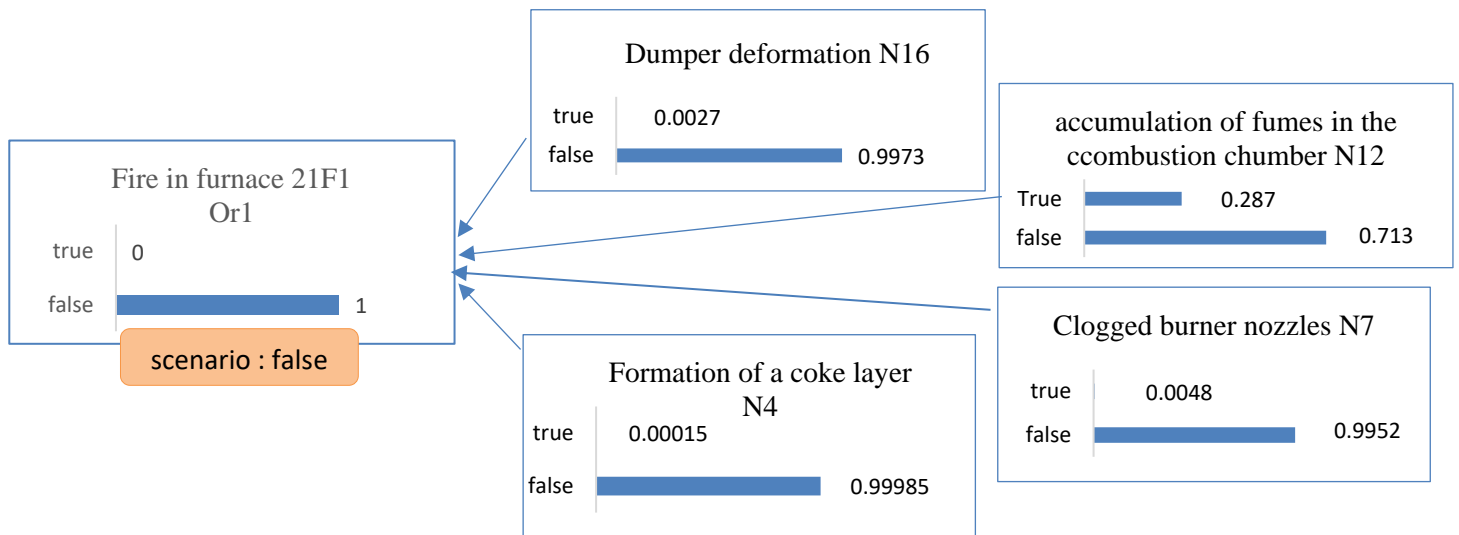


Figure VI.26. Extrait sélectif du modèle bayésien mettant en évidence les résultats après rénovation du four sur la base des paramètres de performance déterminés (actualisation des données et l'application de l'inférence bayésienne)

Tableau VI.26. Comparaison entre les facteurs d'importance probabilistes obtenus par l'Add et le RB avec l'indisponibilité de chaque composant dans le cas de défaillance.

Incendie du four 21F1					
Cas de défaillance					
Nœuds	U _{défaillance}	RB		ADD	
		$I_{Y_i}^{Pr}$	$I_{Y_i}^{Cr}$	$I_{Y_i}^{Pr}$	$I_{Y_i}^{Cr}$
N4	4,56E-01	3,90E-01	9,48E-01	3,91E-01	9,70E-01
N5	1,00E+00	4,67E-02	9,48E-02	4,70E-02	9,70E-02
N6	1,00E+00	7,85E-01	7,68E-01	7,88E-01	7,88E-01
N7	3,10E-01	1,47E-01	4,47E-01	1,48E-01	4,58E-01
N12	1,00E+00	2,62E-01	2,57E-01	2,63E-01	2,63E-01
N16	1,70E-01	1,06E-01	1,81E-01	1,09E-01	1,86E-01

Tableau VI.27. Comparaison entre les facteurs d'importance probabilistes obtenus par l'Add et le RB avec l'indisponibilité de chaque composant dans le cas de rénovation.

Four 21F1					
Cas de rénovation					
Nœud	U _{rénovation}	RB		ADD	
		$I_{Y_i}^{Pr}$	$I_{Y_i}^{Cr}$	$I_{Y_i}^{Pr}$	$I_{Y_i}^{Cr}$
N4	1,50E-04	1,88E-04	1,53E-07	1,91E-04	1,57E-07
N5	6,70E-02	3,42E-08	1,86E-07	3,47E-08	1,91E-07
N6	8,61E-03	4,76E-03	2,14E-03	4,83E-03	2,20E-03
N7	4,80E-03	5,53E-03	1,43E-04	5,61E-03	1,46E-04
N12	2,87E-01	1,18E-02	6,43E-02	1,20E-02	6,60E-02
N16	2,70E-02	1,08E-04	1,58E-05	1,09E-04	1,62E-05

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Tableau VI.28. Comparaison entre l'indisponibilité des composants en fonction du temps selon les trois cas étudiés.

Temps (h)	N4 (Formation une couche de coke à l'intérieur des tubes)	N5 (Détérioration de l'indicateur de température)	N6 (conduite de gaz combustible: Fuite de gaz)	N12 (chambre de combustion:Accumulation de fumée)	N16 (Déformation du dumper)	N7 (colmatage des becs de brûleurs)
6445	1,49E-04	7,78E-02	8,61E-03	2,86E-01	2,70E-04	4,74E-04
6523	1,58E-04	7,77E-02	8,60E-03	2,87E-01	2,71E-04	4,74E-04
6602	1,50E-04	7,78E-02	8,61E-03	2,87E-01	2,71E-04	4,75E-04
6681	1,49E-04	7,77E-02	8,60E-03	2,86E-01	2,70E-04	4,75E-04
6795	1,50E-04	7,79E-02	8,61E-03	2,87E-01	2,70E-04	4,75E-04
6838	2,39E-02	1,51E-01	8,06E-02	3,59E-01	2,60E-02	3,65E-02
6916	2,40E-02	2,23E-01	1,53E-01	5,68E-01	4,53E-02	5,45E-02
6995	9,60E-02	2,95E-01	2,25E-01	6,40E-01	7,23E-02	7,25E-02
7074	1,68E-01	4,39E-01	4,41E-01	7,12E-01	9,80E-02	1,55E-01
7152	2,40E-01	6,55E-01	5,85E-01	7,84E-01	1,08E-01	2,38E-01
7231	3,12E-01	7,27E-01	7,29E-01	8,56E-01	1,17E-01	2,56E-01
7309	3,84E-01	9,43E-01	8,64E-01	9,28E-01	1,44E-01	2,74E-01
7388	4,56E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,70E-01	3,10E-01
7467	3,84E-01	9,28E-01	9,28E-01	9,28E-01	9,80E-02	1,89E-01
7545	2,40E-01	4,98E-01	4,96E-01	8,56E-01	6,20E-02	6,73E-02
7624	9,60E-02	2,83E-01	6,34E-02	6,40E-01	4,40E-02	5,16E-02
7702	7,19E-02	1,75E-01	4,97E-02	4,96E-01	3,50E-02	3,60E-02
7781	1,81E-02	8,11E-02	3,60E-02	3,91E-01	2,60E-02	2,04E-02
7860	1,50E-04	6,77E-02	8,61E-03	2,87E-01	2,70E-02	4,75E-03

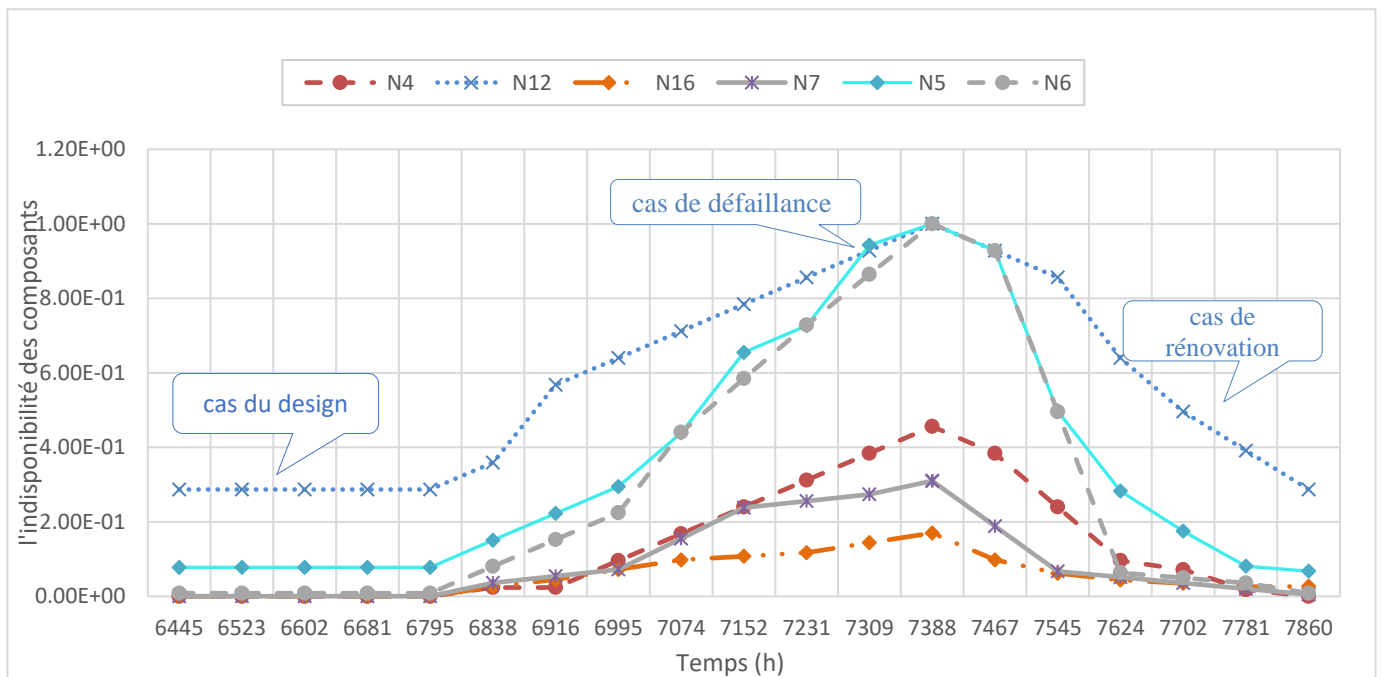


Figure VI.27. Variation de l'indisponibilité des composants en fonction du temps dans les trois cas étudiés.

VI.6.1. Interprétation des résultats obtenus à partir des paramètres de performance intégrés dans le réseau bayésien

Un extrait sélectif du modèle bayésien est présenté dans la figure VI.25. Il met en évidence la structure développée pour le cas de défaillance, qui indique clairement qu'en cas de défaillance, l'indisponibilité du système est égale à 0,75. Compte tenu de cette valeur élevée, le système doit être mis hors service pour un examen et un diagnostic plus approfondi. L'indisponibilité de chaque événement est décrite en détail dans le tableau VI.26, qui met également en évidence les éléments ayant eu un impact sur l'état opérationnel du système. L'accident du four a été déclenché par ces conditions de travail. Ce point a également bien été souligné dans la partie précédente §VI.5.4

Après rénovation, l'équipement a été remis en service pour réchauffer le fluide. Une diminution de l'indisponibilité d'environ 77 % est constatée en comparaison avec le cas de défaillance. Par conséquent, cette valeur est jugée acceptable pour un système fonctionnant de manière satisfaisante, atteignant 0,17 (Figure VI.26) avec une probabilité d'indisponibilité pour chaque élément rénové, selon les résultats obtenus dans le tableau VI.27.

Les résultats obtenus par RB viennent confirmer les conclusions tirées précédemment à propos des événements qui ont mené à l'incendie du four. Il s'agit notamment de l'accumulation de fumée dans la chambre de combustion, de l'encrassement du brûleur, de la formation de coke à l'intérieur des tubes et de la déformation du dumper. D'autres facteurs, tels qu'une fuite dans la conduite de gaz combustible, ont également contribué au mauvais état du système. Tout cela a été des facteurs déterminants de l'incendie du four, ce qui est conforme aux résultats obtenus par la méthode de calcul thermique.

Les facteurs d'importance probabilistes de Birnbaum et critique ont été utilisés pour identifier les événements. Ceux-ci offrent la possibilité de hiérarchiser et de sélectionner les éléments qui, dans le cas de défaillance, affectent le plus le système. Dans notre cas, les facteurs identifiés sont ceux qui ont fait l'objet d'une rénovation et qui ont été pris en compte lors de l'inspection et du diagnostic. Ainsi, nous avons été en mesure de repérer les éléments les plus critiques et les plus significatifs pour l'étude d'accident en se basant sur ces facteurs probabilistes. À titre d'exemple (Tableau VI.26) , dans le cas de défaillance, l'encrassement du brûleur a été évalué avec un facteur d'importance de Birnbaum de 1,47 et un facteur d'importance critique de 0,447. La déformation du dumper s'est vu attribuer un facteur d'importance de Birnbaum de 1,06 et un facteur d'importance critique de 0,181.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Après la rénovation, la valeur des FIPs de Birnbaum et critique a diminué, comme indiqué dans le tableau VI.27, prouvant que les travaux de rénovation ont permis de réduire le risque lié à l'endommagement des composants

VI.6.2. Variation de l'indisponibilité des éléments identifiés en fonction du temps dans les trois études (design, défaillance et rénovation)

Chaque élément identifié a fait l'objet d'un suivi rigoureux afin d'analyser son comportement. Cette partie contient une évaluation qui met en évidence le comportement de chaque événement dans les trois cas suivants : design, défaillance et rénovation, sur une période de 7 860 heures (Figure VI.27). Pour assurer la lisibilité et la cohérence, un extrait de cette analyse est présenté dans le tableau VI.28. Ces éléments ont été présentés dans le cas du design au départ, où leurs comportements semblent initialement conformes à ce qui est attendu. En effet, dans cette phase, l'indisponibilité de chaque élément est relativement constante, avec quelques légères fluctuations dans le temps présentant des valeurs réduites. A titre d'exemple, la déformation du dumper est de l'ordre de 2.7×10^{-4} .

Au fil du temps, le risque d'indisponibilité des composants en cas de défaillance devient plus important, voire critique dans certains éléments, un dégagement d'une fumée dense dans la cheminée est corrélé à cette augmentation. En revanche, la rénovation entraîne une diminution progressive de l'indisponibilité au fil du temps. Cette diminution est conforme aux constats précédents relatifs à la méthode de calcul thermique, ainsi qu'aux constats tirés ci-dessus §VI.6.1.

Par exemple, la formation de coke, estimée à 1.50×10^{-4} , révèle que le système fonctionne de manière adéquate après la rénovation de tous les serpentins de la charge, avec une disponibilité considérable du système allant jusqu'à 83 %. Cela se confirme par le fait que le taux de charge est passé de 70 % à 100 %. Ainsi, le débit du BRA est passé de $36 \text{ m}^3/\text{h}$ à $51 \text{ m}^3/\text{h}$ (Voir l'annexe A, Tableau A.2)

VI.6.3. Comparaison entre l'ADD et le RB

Les résultats du réseau bayésien (RB) ont été comparés à ceux de l'analyse par arbre de défaillance (ADD). Les tableaux VI.10, VI.26 et VI.27 présentent respectivement les résultats obtenus pour les cas de design, de défaillance et de rénovation.

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

Il ressort du Tableau VI.10 que les résultats obtenus sont approximatifs, à savoir une erreur relativement de 0,00352 pour le facteur d'importance de Birnbaum et de 0,0053 pour le facteur d'importance critique dans le cas du design. De même, les résultats obtenus par le réseau bayésien et ADD sont approximatifs, avec une erreur relative de 0,00847 pour le facteur d'importance de Birnbaum et de 0,0241 pour le facteur d'importance critique dans le cas de défaillance. Il est également à noter que le résultat obtenu pour le cas de rénovation est approximatif, soit une erreur relative de 0,0141 pour le facteur d'importance de Birnbaum et de 0,05 pour le facteur d'importance critique.

En conclusion, Les résultats obtenus par le réseau bayésien, conformes à l'arbre de défaillance, présentent des similitudes notables avec une marge d'erreur minimale. Cela confirme la validité du modèle bayésien et sa capacité à évaluer les facteurs d'importance probabilistes de Birnbaum et critique de chaque élément du système.

Dans ce contexte, il est essentiel de noter que les résultats issus de la méthode d'analyse par l'ADD dans les cas de défaillance et de rénovation proviennent du réseau bayésien (RB) à partir des probabilités obtenues suite à la prise en compte des paramètres de performance. Vu que ces probabilités restent les mêmes pour l'ADD, les facteurs d'importance probabilistes FIPs ont été déterminés pour ces deux cas, en faisant une sorte de travail inverse.

VI.7. Conclusion : Synthèse générale de l'étude de cas

Tableau VI.29. Synthèse générale des résultats de l'étude pour les trois cas étudiés

Synthèse générale de l'étude de cas		Cas réel		
		Cas du design	Cas de défaillance	Cas de rénovation
Probabilité de l'indisponibilité du système		0,0473	0,7523	0,17
Paramètres de performance	Rendement thermique (%)	96.33	65	78
	Quantité de chaleur absorbée (Kcal/h)	4885012,28	2686400,94	3500571,21
	Coefficient de transfert de chaleur ($w/m^2 \cdot ^\circ c$)	19,164	18,704	20,86
Fiabilité du système		0,9527	0,2477	0,83

Pour mettre en lumière la méthodologie proposée, deux différentes méthodes ont été adoptées. Dans la première méthode, l'étude de la fiabilité dynamique du système du four était le principal objectif dans le contexte de sa conception initiale. La seconde méthode s'est focalisée sur le calcul thermique des paramètres de performance du four. Les principaux

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

objectifs de cette étude étaient de donner une vue d'ensemble du fonctionnement du four et de vérifier ses paramètres de performance en détail, en mettant l'accent sur les changements apportés à la suite de la rénovation.

Afin de réduire les accidents dans les fours, un ensemble de recommandations a été mis au point après une analyse réalisée à l'aide des méthodes de l'HAZOP et de l'AMDEC. En mettant en pratique des actions préventives et correctives, ces recommandations ont pour objectif de détecter et d'atténuer les risques possibles liés à l'exploitation du four. Au nombre des mesures recommandées, citons :

- ✓ Procédure d'arrêt d'urgence /procédure opérationnelle : arrêt d'urgence afin de mettre en sécurité l'unité.
- ✓ Rondes d'inspection /procédure d'inspection : des tournées par des personnes dûment qualifiées pour contrôler visuellement l'unité ou l'équipement.
- ✓ Formation du personnel et vigilance à l'égard de la sécurité.
- ✓ Recours à des matériaux ignifuges.
- ✓ Il est recommandé d'utiliser un équipement thermographique pour contrôler la température des fours. Les caméras thermiques sont utilisées pour identifier les points chauds, les problèmes d'isolation thermique et les dysfonctionnements. Les inspections par caméra thermique sont effectuées fréquemment pour aider à repérer les zones critiques et à mettre en œuvre des mesures préventives. Le fait de prendre en compte la thermographie dans les procédures de maintenance renforce la sécurité et augmente la longévité des fours.
- ✓ Assurer une évaluation continue aux risques : Effectuer régulièrement des analyses de risques afin de repérer les éventuelles menaces nouvelles et de modifier les protocoles de sécurité si nécessaire. Cela permet de se tenir au courant des normes de sécurité en vigueur et de mettre en œuvre, éventuellement, des actions préventives supplémentaires.

Ces suggestions sont destinées à diminuer le risque d'incendie et à renforcer la sécurisation du four. Ces mesures peuvent être mises en œuvre et être constamment revues et mises à jour afin de tenir compte de l'évolution des besoins et des exigences en matière de sécurité.

Ensuite, Il ressort des résultats obtenus par la méthode de calcul thermique que les paramètres de performance sont liés aux facteurs suivants :

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

- ✓ L'ancienneté de l'équipement est un facteur important qui peut accélérer la diminution des paramètres de performance et génère une quantité de polluants.
- ✓ Les pertes de chaleur par les parois du four sont dues à des imperfections dans l'isolation thermique.
- ✓ Les pertes de chaleur par les fumées sont dues à un excès d'air inutile, qui représente une perte de chaleur supplémentaire, ainsi qu'à une élévation de la température des fumées, ce qui aggrave la baisse de rendement.

En intégrant ces paramètres dans notre étude initiale, nous avons pu obtenir des résultats importants concernant l'indisponibilité du système en cas de défaillance. De plus, une telle analyse nous a permis de classer les éléments ayant un impact sur le système et qui ont conduit à l'incendie du four.

Dans le cas de défaillance, l'indisponibilité du système est supérieure à celle observée dans le cas du design. Après la rénovation, l'indisponibilité est diminuée à environ 77,40 % de ce qu'elle était dans le cas de défaillance

Par ailleurs, la fiabilité du système est inférieure dans le cas de défaillance à celle du cas du design. Après la rénovation, la fiabilité est passée à environ 70,16 % de ce qu'elle était dans le cas de défaillance. Cette amélioration a été apportée à la suite d'une inspection de l'état interne du four et des travaux de rénovation effectués.

La présente étude peut être étendue à une large variété d'équipements en recherchant les paramètres de performance y afférents, ainsi que les données opérationnelles et les caractéristiques de la charge. Toutefois, il convient de souligner qu'il peut être difficile de définir les propriétés physico-chimiques de la charge, car le comportement de la charge peut changer en fonction de la température et de la pression, en citant la viscosité et la vitesse du fluide servant à déterminer le régime d'écoulement, ou d'éventuelles réactions chimiques en présence de substances. En outre, les données disponibles peuvent être limitées ou les instruments de mesure peuvent présenter des défauts qui entraînent des valeurs erronées. En ce qui concerne la première analyse, elle s'applique à tout type de système.

La nouveauté dans ce travail est d'évaluer la fiabilité du système à l'aide des paramètres de performance de l'équipement. Une réelle différence avec les travaux d'autres auteurs, plusieurs travaux visant à réduire les risques d'accident sont basés sur la première analyse, dans laquelle ils ont mené des études approfondies en utilisant diverses méthodes pour

Chapitre VI : Approche intégrée pour la maîtrise des incendies du four industriel : étude de cas fondée sur l'analyse des risques et le calcul thermique

identifier les risques et les dangers d'un système à travers l'évaluation de différents facteurs qui correspondent à cette analyse. Contrairement à notre méthodologie, qui est basée sur le calcul thermique, cette méthode utilise les paramètres de performance de l'équipement pour déterminer l'état du système et son fonctionnement. Par la suite, en associant à l'analyse initiale.

Conclusion générale

Ce travail a couvert plusieurs méthodes d'évaluation des risques, y compris l'AMDEC, HAZOP, l'arbre des défaillances, l'utilisation de réseaux bayésiens et la méthode de calcul thermique. Un aspect particulier de cette étude porte sur la comparaison de trois cas différents : cas de design, cas de défaillance et cas de rénovation.

La mise en œuvre de l'AMDEC est parvenue à mettre en évidence les modes de défaillance susceptibles de se produire, ainsi que leurs effets et leur criticité. Cette méthode offre une base solide permettant de définir les mesures à prendre pour la prévention et la maintenance pour limiter le risque de défaillance, ce qui était l'objectif principal de la rénovation.

La méthode HAZOP vient compléter l'analyse en mettant en évidence tous les dangers et risques, et en évaluant leur effet sur la sécurité et l'opérabilité du système. Les aspects liés à l'exploitation du système, des principaux paramètres opérationnels ont été pris en compte.

Le recours à l'arbre des défaillances nous a permis de représenter les causes à l'origine de l'incendie du four. La probabilité d'occurrence du scénario de défaillance a été quantifiée, et les éléments critiques associés à chaque cas ont été identifiés.

La méthode de calcul thermique a été utilisée pour évaluer la performance de l'équipement dans chaque cas, en tenant compte de la composition du combustible, de l'écoulement et des propriétés physico-chimiques de la charge, ainsi que des paramètres de service (pression, température, débit). Ainsi, nous avons pu déterminer les paramètres de performance dans chaque cas, à savoir le rendement thermique, la quantité de chaleur absorbée et le coefficient de transfert de chaleur.

Une connaissance plus approfondie du comportement du système étudié a été rendue pratique par le biais d'une analyse complémentaire utilisant le réseau bayésien. Grâce à cette méthode, nous avons pu déterminer les principaux éléments et évaluer la manière dont ils affecteront la performance et la disponibilité du système. Le réseau bayésien ajoute une dimension probabiliste aux résultats en incorporant des données probabilistes relatives aux paramètres de performance et en recourant à l'inférence bayésienne, ce qui donne une image plus complète et plus claire de la fiabilité du système après rénovation.

Revue de la thèse

La thèse comprend une succession de chapitres couvrant divers aspects liés à la sécurité et à la prévention des accidents dans les fours industriels. Tous les chapitres couvrent des sujets propres. Dans un premier temps, nous sommes intéressés au rôle essentiel que jouent les fours industriels dans l'industrie. Nous avons longuement étudié leur fonction dans l'industrie ainsi que les facteurs importants à prendre en compte lors de la sélection d'un four approprié. Cet aperçu approfondi des fours industriels et des méthodes employées pour déterminer les paramètres de performance a servi de base à notre recherche.

Le retour d'expérience des accidents de fours industriels a été l'élément suivant que nous avons étudié. Nous avons examiné attentivement la démarche de retour d'expérience, en nous concentrant principalement sur les accidents des fours qui se sont passés dans le monde. Nous avons également abordé les principaux risques liés aux fours, ainsi que les nombreuses mesures de sécurité mises en place pour y remédier. Enfin, nous avons passé en revue les normes et les lois internationales qui sont essentielles comme moyen efficace de limiter les risques liés à l'utilisation des fours industriels. Suite à cette recherche approfondie sur les retours d'expérience, les accidents et les mesures de sécurité, nous sommes en mesure de mettre en évidence les bonnes pratiques à suivre en termes de sécurité et de prévention des accidents survenus aux fours industriels.

Une revue de littérature est également établie, mettant en exergue le concept de sûreté de fonctionnement et les notions qui s'y rapportent. Nous avons mis l'accent sur son importance dans la maîtrise de la sécurité, l'amélioration de la disponibilité et la fiabilité, tout en tenant compte de l'idée de coût. Nous avons également défini certains termes comme FDMS, métrique de la sûreté de fonctionnement, défaillance, qui sont souvent évoqués pour décrire la sûreté de fonctionnement. De plus, les principales méthodes d'analyse prédictive des risques ont été abordées, en essayant de les positionner selon leurs modes de raisonnement et d'application. Tout en identifiant les avantages et les limites des méthodes retenues pour notre travail, nous avons également présenté les critères de choix pouvant être adoptés pour une méthode d'analyse appropriée.

Un chapitre consacré au recours à la technique bayésienne dans l'analyse des risques conclut la thèse dans sa partie théorique. D'une part, nous avons pris connaissance de la littérature sur les réseaux bayésiens de manière générale, et d'autre part, nous avons pris connaissance également sur les réseaux bayésiens en analyse quantitative des risques. Parmi

les éléments essentiels de notre méthodologie, citons la transformation de l'arbre de défaillance en réseau bayésien et la mise en œuvre de l'inférence bayésienne pour déterminer les facteurs d'importance probabilistes.

Nous avons commencé la partie expérimentale de cette thèse en définissant la zone d'étude "four de l'unité de distillation sous vide", en décrivant le four et le processus de l'unité, ainsi que les points dangereux associés aux produits et au procédé. Nous avons ensuite présenté le problème à travers deux exemples tirés d'accidents survenus dans ce four, en identifiant toutes les causes probables de détérioration du four, ainsi que les travaux de rénovation effectués après l'accident. Pour décrire ces causes, nous avons utilisé deux méthodes, AMDEC et HAZOP. Les résultats obtenus selon ces deux méthodes nous permettent de déterminer tous les risques possibles et de mettre en œuvre des mesures correctives et préventives, y compris des travaux de rénovation. Les paramètres de performance du four sont également déterminés à partir de calculs thermiques selon trois cas : design, défaillance et rénovation, qui sont ensuite intégrés dans le RB pour analyser le système dans son état de défaillance et après rénovation.

Perspectives

Ce sujet d'étude offre la voie à de nouvelles pistes dans le développement de méthodes de prédiction fondées sur l'intelligence artificielle au service de la sûreté de fonctionnement, dans le but de créer des modèles dynamiques et performants, capables d'assurer la mise en œuvre d'une gestion en temps réel des systèmes, ou bien encore de mettre au point de nouvelles solutions technologiques et de nouveaux types d'instruments de mesure destinés à la supervision en temps réel des équipements industriels, offrant ainsi une plus grande précision. Dans ce contexte, les principales propositions à faire portent sur les points suivants :

Les évolutions technologiques ouvrent des perspectives prometteuses en matière de renforcement des fonctionnalités de surveillance et de suivi des équipements. Par exemple, il est possible de concevoir des capteurs plus performants et plus sensibles capables d'identifier d'infimes changements dans des variables critiques comme la température et la pression. Il serait ainsi possible de surveiller l'état de l'équipement à un niveau plus fin, ce qui permettrait de détecter rapidement les pannes et de mettre en place des mesures préventives.

Le développement de l'internet des objets (IoT) [160] comme une technologie de communication de fine pointe pourraient être intégrés pour assurer la collecte et l'analyse de

données en temps réel, ce qui rendra possible la prise de décisions plus rapides et plus précises en matière d'entretien et de réparations.

les systèmes d'information géographique (SIG) constituent un outil puissant. Il est possible de modéliser et de représenter des scénarios catastrophiques probables en fusionnant des données géographiques, des informations sur les installations, PHAST est un exemple de logiciel très répandu dans le secteur pétrolier. Les SIG peuvent être combinés à des approches d'aide à la décision hybrides et dynamiques, qui intègrent de nombreuses méthodes et modèles afin de générer des décisions éclairées et optimales. Ces méthodes peuvent faire usage des réseaux de Petri, qui sont à la fois des modèles graphiques permettant de décrire et d'évaluer le comportement des systèmes dynamiques et également un modèle probabiliste. Cela permet de mettre en place des mesures de gestion des risques plus appropriées, une meilleure compréhension des impacts potentiels des accidents, ainsi que des actions de prévention et d'intervention optimisées, et d'augmenter la marge de tolérance au risque de l'industrie pétrolière dans son ensemble.

Bibliographie

- [1] Kabir S. An overview of fault tree analysis and its application in model-based dependability analysis. *Expert Systems with Applications* 2017, 77:114 135.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.01.058>
- [2] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, Ciancamerla E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety* 2001, 71(3):249 260. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00077-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00077-6)
- [3] Yao Yiping, Yang Xiaojun, Li Peiqiong. Dynamic fault tree analysis for digital fly-by-wire flight control system. 15th DASC. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference 1996;479 484. <https://doi.org/10.1109/DASC.1996.559203>
- [4] Simeu-Abazi Z, Lefebvre A, Derain J.-P. A methodology of alarm filtering using dynamic fault tree. *Reliability Engineering & System Safety* 2011;96(2):257 266.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.09.005>
- [5] Baybutt P. A critique of the Hazard and Operability (HAZOP) study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2015; 33:52 58. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.11.010>
- [6] Wu J, Lind M. Management of System Complexity in HAZOP for the Oil & Gas Industry. *IFAC-PapersOnLine* 2018;51(8):211 216. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.379>
- [7] Wang Y, Xie M. Approach to Integrate Fuzzy Fault Tree with Bayesian Network. *Procedia Engineering* 2012; 45:131 138. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.133>
- [8] Malika M, Khochmane L, Bouzaouit A, Bennis O. Transformation of fault tree into Bayesian Network Methodology for Fault Diagnosis. *Mechanics* 2017;23(6):891 899.
<https://doi.org/10.5755/j01.mech.23.6.17281>
- [9] Taleb-berrouane, M., Khan, F., & Lounis, Z. (2016). Availability analysis of safety critical systems using advanced fault tree and stochastic Petri net formalisms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 193 203. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.09.007>
- [10] Maschio C, Schiozer D.J. Bayesian history matching using artificial neural network and Markov Chain Monte Carlo. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2014; 123:62 71.
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.05.016>
- [11] Hu J.-L, Tang X.-W, Qiu J.-N. Assessment of seismic liquefaction potential based on Bayesian network constructed from domain knowledge and history data. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2016; 89:49 60. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.07.007>

- [12] Thomopoulos N.T. Continuous Uniform. Dans N. T. Thomopoulos, *Statistical Distributions* (p. 13-19). Springer International Publishing 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65112-5_2
- [13] Sun, B., Li, Y., Wang, Z., Yang, D., Ren, Y., & Feng, Q. (2021). A combined physics of failure and Bayesian network reliability analysis method for complex electronic systems. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 698-710. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.023>
- [14] 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.* 94(4) (2009), 872–883.
- [15] G. Merle, J.-M. Roussel, J.-J. Lesage, V. Perchet, and N. Vayatis, Quantitative analysis of dynamic fault trees based on the coupling of structure functions and Monte Carlo simulation, *Qual Reliab Eng Int.* 32(1) (2016), 7–18
- [16] E. Ruijters and M. Stoelinga, Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools, *Comput Sci Rev.* 15-16 (2015), 29–62.
- [17] P. Weber, G. Medina-Oliva, C. Simon, and B. Iung, Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas, *Eng Appl Artif Intell.* 25(4) (2012), 671–682.
- [18] Ryad Zemouri. Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance. *Automatique / Robotique*. Université de Franche-Comté, France, 2003.
- [19] VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652-2670. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.007>
- [20] Isidore JACUBOWIEZ. Fours industriels. *Techniques de l'Ingénieur*, Janvier 1998.
- [21] Withuier J. Fours tubulaires, Raffinage et génie chimique, tome II (2^{ème} édition) Technip,Lavoisier, pp.1158-1192, Paris 1972.
- [22] Raffinerie d'Arzew. Manuel opératoires des fours. Arzew, Algérie 2020.
- [23] Steward, F. R., & Cannon, P. (1971). The calculation of radiative heat flux in a cylindrical furnace using the Monte Carlo Method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 14(2), 245-262. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(71\)90092-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(71)90092-5)

- [24] Teng, F., & Li, H. (2009). Adaptive fuzzy control for the electric furnace. 2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2, 439-443. <https://doi.org/10.1109/ICICISYS.2009.5358363>
- [25] Harvey, J.-P., & Gheribi, A. E. (2014). Process Simulation and Control Optimization of a Blast Furnace Using Classical Thermodynamics Combined to a Direct Search Algorithm. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45(1), 307-327. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-0004-9>
- [26] Institut Algérien de Pétrole. Manuel opératoire des fours et chaudières, école d'Oran Algérie.
- [27] Hottel, H. C., & Sarofim, A. F. (1965). The effect of gas flow patterns on radiative transfer in cylindrical furnaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 8(8), 1153-1169. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(65\)90141-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(65)90141-9)
- [28] Hosseini R, Hosseini-Ghaffar A, Soltani M. Experimental determination of shell side heat transfer coefficient and pressure drop for an oil cooler shell-and-tube heat exchanger with three different tube bundles. *Applied Thermal Engineering* 2007;**27(5-6)**:1001-1008. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.07.023>
- [29] Sarmiento A.P.C, Soares V.H.T, Milanez F.H, Mantelli M.B.H. Heat transfer correlation for circular and non-circular ducts in the transition regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2020; **149:119165**. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119165>
- [30] Salimpour M.R. Heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2009;**33(2)**:203-207. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.07.015>
- [31] Ghasemkhani H, Keyhani A, Aghbashlo M, Rafiee S, Mujumdar A.S. Improving exergetic performance parameters of a rotating-tray air dryer via a simple heat exchanger. *Applied Thermal Engineering* 2016; **94:13-23**. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.114>
- [32] Universiti Malaysia Pahang, Tahseen T.A, Rahman M.M, Ishak M. An Experimental Study of Air Flow and Heat Transfer over in-Line Flat Tube Bank. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 2014; **9:1487-1500**. <https://doi.org/10.15282/ijame.9.2014.1.0123>
- [33] Chunsheng W, Yan Z, Zejun L, Fuxiang Y. Heat transfer simulation and thermal efficiency analysis of new vertical heating furnace. *Case Studies in Thermal Engineering* 2019; **13:100414**. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100414>

- [34] Wang J, Liu Y, Sundén B, Yang R, Baleta J, Vujanović M. Analysis of slab heating characteristics in a reheating furnace. *Energy Conversion and Management* 2017; **149:928-936**. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.005>
- [35] THE SEVESO ACCIDENT : ITS NATURE, EXTENT AND CONSEQUENCES. (1979). *The Annals of Occupational Hygiene*. <https://doi.org/10.1093/annhyg/22.4.327>
- [36] Stéphane, F& Martine, P. (2008). The Feyzin Disaster: A Catalyst for Change. in *Process Safety Progress*, Vol. 27, Issue 4. <https://doi/abs/10.1002/prs.10241>
- [37] Chang, J. I., & Lin, C.-C. (2006). A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(1), 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.05.015>
- [38] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2019). Husky Superior Refinery Explosion and Fire [Investigation Report]. Consulté 13 janvier 2023, à l'adresse https://www.csb.gov/assets/1/20/Husky_Final_Report_1_14_19.pdf
- [39] U.S. Chemical Safety Board. (2014). Tesoro Refinery Fatal Explosion and Fire | CSB. [Investigation Report]. Consulté 13 décembre 2022, à l'adresse <https://www.csb.gov/tesoro-refinery-fatal-explosion-and-fire/>
- [40] La base de données ARIA. La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques. Consulté 14 janvier 2023, à l'adresse <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/le-barpi/la-base-de-donnees-aria/>
- [41] Shammass, P. (1999). Algeria: Review of Petroleum, Politics and Risks. *Energy Exploration & Exploitation*, 17(1), 1-65. <https://doi.org/10.1177/014459879901700101>
- [42] Chettouh, S. (2021). Proposition d'une démarche de Retour d'Expérience pour l'évaluation et la prévention des accidents industriels. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 7(1), 1805-1818.
- [43] Front Matter. (2003). In *Industrial Fire Protection Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118903117.fmatter>
- [44] Espejo, V., Vílchez, J. A., Casal, J., & Planas, E. (2021). Fired equipment combustion chamber accidents : A historical survey. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 71, 104445. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104445>
- [45] Porter, M. (2004). *Gas Burners for Forges, Furnaces, & Kilns*. Skip Jack Press.
- [46] Stricker, R., & Ellenberger, P. (2021). *Pressure Vessels: The ASME Code Simplified*, Ninth Edition. McGraw-Hill Education.

- [47] Cai, H., Krzywicki, A., & Oballa, M. C. (2002). Coke formation in steam crackers for ethylene production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 41(3), 199-214. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(01\)00135-0](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(01)00135-0)
- [48] El-Gendy, N. S., & Speight, J. G. (2015). *Handbook of Refinery Desulfurization*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19102>
- [49] Cadick, J., Capelli-Schellpfeffer, M., & Neitzel, D. (2000). *Electrical Safety Handbook*. McGraw-Hill.
- [50] Fowler, T. W., & Miles, K. K. (2002). *Electrical Safety : Safety and Health for Electrical Trades. Student Manual*. NIOSH, Publications Dissemination, 4676 Columbia Parkway, Cincinnati, OH 45226-1998.
- [51] Mullinger, P., & Jenkins, B. (2008). Chapter 5—Flames and burners for furnaces. In P. Mullinger & B. Jenkins (Éds.), *Industrial and Process Furnaces* (p. 141-207). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8692-1.00005-3>
- [52] Mullinger, P., & Jenkins, B. (2008). Chapter 8—Furnace control and safety. In P. Mullinger & B. Jenkins (Éds.), *Industrial and Process Furnaces* (p. 287-333). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8692-1.00008-9>
- [53] Suárez Sánchez, F. A., Carvajal Peláez, G. I., & Catalá Alís, J. (2017). Occupational safety and health in construction : A review of applications and trends. *INDUSTRIAL HEALTH*, 55(3), 210-218. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2016-0108>
- [54] Xue, L., Fan, J., Rausand, M., & Zhang, L. (2013). A safety barrier-based accident model for offshore drilling blowouts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(1), 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.10.008>
- [55] Xin, H., Zhaopeng, N., Lei, P., & Ping, Z. (2013). Experimental study of fire barriers preventing vertical fire spread in ETISs. *MATEC Web of Conferences*, 9, 04003. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20130904003>
- [56] Fitzgerald, R. W. (2004). *Building Fire Performance Analysis*. John Wiley & Sons.
- [57] Buchanan, A. H., & Abu, A. K. (2017). *Structural Design for Fire Safety*. John Wiley & Sons.
- [58] Évaluation de la performance des barrières techniques de sécurité OMEGA 10, RAPPORT D'ÉTUDE– INERIS – 2018 (p.7-17)
- [59] Yacine, B. (2021). Développement et validation d'une approche de décision sociotechnique liée aux problèmes d'industrialisation en Algérie. Université chahid Mostefa

ben Boulaïd de BATNA 2 institut d'hygiène et sécurité industrielle (IHSI) laboratoire de recherche en prévention industrielle (LRPI).

[60] Directive 2014/68/UE du Parlement européen et du Conseil, relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression (refonte). Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE, EP, CONSIL, 189 OJ L (2014). <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/68/oj/fra>

[61] Algeria—Décret exécutif n° 03-451 du 1er décembre 2003 définissant les règles de sécurité applicables aux activités portant sur les matières et produits chimiques dangereux ainsi que les récipients de gaz sous pression. Consulté 26 mars 2023, à l'adresse https://www.ilo.org/dyn/natlex/natlex4.detail?p_isn=66183

[62] EL BAHLOUL, I., & SEVEQUE, J.-L. (2009). Étude de dangers des ICPE Mesures compensatoires – Exemples : Prévention des feux de nappe et du BLEVE. In *Techniques de l'ingénieur Environnement : Vol. base documentaire : TIP800WEB*. (Numéro réf. article : g4214). Editions T.I. <https://doi.org/10.51257/a-v1-g4214>

[63] LEROY, G. (2010). Feu torche Accidentologie, description, modélisation. In *Techniques de l'ingénieur Risques d'incendie : Vol. base documentaire : TIB583DUO*. (Numéro réf. article : se5125). Editions T.I. <https://doi.org/10.51257/a-v1-se5125>

[64] OUERDANE, L. (2020). Évaluation univoque de la suppression d'une explosion de gaz. In *Techniques de l'ingénieur Sécurité et gestion des risques: Vol. base documentaire : TIP112WEB*. (Numéro ref. article : se5082). Editions T.I. <https://doi.org/10.51257/a-v1-se5082>

[65] Lobato, J., Canizares, P., Rodrigo, M., Saez, C., & Linares, J. (2006). A comparison of hydrogen cloud explosion models and the study of the vulnerability of the damage caused by an explosion of H₂. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(12), 1780-1790. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.01.006>

[66] Hu, L. (2017). A review of physics and correlations of pool fire behaviour in wind and future challenges. *Fire Safety Journal*, 91, 41-55. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.008>

[67] Ramírez-Camacho, J. G., Pastor, E., Casal, J., Amaya-Gómez, R., & Muñoz-Giraldo, F. (2015). Analysis of domino effect in pipelines. *Journal of Hazardous Materials*, 298, 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.05.033>

[68] FAUCHER, Sûreté de fonctionnement Concepts et enjeux. *Techniques de l'ingénieur*, octobre 2008. <https://doi.org/10.51257/a-v1-mt9200>

- [69] Guetarni, I. H. M. Analyse Quantitative des Risques : Application sur les Bacs de Stockage. Université d'Oran 2 Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle. Laboratoire de l'Ingénierie de la Sécurité industrielle et de Développement Durable, Algérie 2019.
- [70] Bernardi, S., Merseguer, J., & Petriu, D. C. (2013). Dependability Analysis Techniques. In S. Bernardi, J. Merseguer, & D. C. Petriu, Model-Driven Dependability Assessment of Software Systems (p. 73-90). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39512-3_6
- [71] Villemeur A., (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels ; Fiabilité, Facteurs Humains, Informatisation. Editions Eyrolles, Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France (EDF) - France, 822 pages.
- [72] Anass BOUCHIBA. evaluation de dysfonctionnement d'un système par approche bayésienne : cas du système ferroviaire. Ecole doctorale d'Angers, Ecole doctorale de l'EMI, Laboratoire du Génie Industriel de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (IMOSYS), Maroc 2009.
- [73] Amel DEMRI. Contribution à l'évolution de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle. Laboratoire de sûreté de fonctionnement, Qualité et organisation. ANGERS 2009.
- [74] Mohamed-Habib MAZOUNI. Pour une Meilleure Approche du Management des Risques : De la Modélisation Ontologique du Processus Accidentel au Système Interactif d'Aide à la Décision. Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL 2008.
- [75] F. Khan, S. Rathnayaka, and S. Ahmed, Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future, Process Saf Environ Prot. 98 (2015), 116–147.
- [76] J-P. Fournier. Fiabilité du logiciel. Concepts, modélisations, perspectives. Hermes, 1993
- [77] Y. Mortureux. La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques. Techniques de l'ingénieur, octobre 2001
- [78] Alessandro Birolini, Reliability Engineering Theory and Practice, Springer, 2007
- [79] David J Smith, RELIABILITY, MAINTAINABILITY AND RISK Practical methods for engineers, Elsevier, 2001.
- [80] Norman FENTON, Martin NEIL. Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks. 2013.
- [81] Rudolph Frederick Stapelberg, Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design, Springer, 2009.

- [82] Benard, V., Cauffriez, L., & Renaux, D. (2001). Point of View of Availability Assessment for Complex system : A Method Based onto Transfer Function. IFAC Proceedings Volumes, 34(17), 255-260. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)33289-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33289-5)
- [83] Michael Todinov, RELIABILITY AND RISK MODELS SETTING RELIABILITY REQUIREMENTS, John Wiley, 2016.
- [84] Henri PROCACCIA, Eric FERTON and Marc PROCACCIA. Fiabilité Et Maintenance Des Matériels Industriels Réparables Et Non Réparables. Lavoisier Paris 2011.
- [85] Monchy F. & Kojchen C., 2015, "Maintenance : Outils, méthodes et organisations pour une meilleure performance", Quatrième Edition, Dunod, ISBN : 2100739697, 9782100739691, 624 pages.
- [86] Yacine, B. Développement et validation d'une approche de décision sociotechnique liée aux problèmes d'industrialisation en Algérie. Université Chahid Mostefa Ben Boulaïd de Batna 2 institut d'hygiène et sécurité industrielle (IHSI) laboratoire de recherche en prévention industrielle (LRPI), Algérie 2021.
- [87] IGOR USHAKOV, PROBABILISTIC RELIABILITY MODELS, John Wiley, 2012.
- [88] Salima BELEULMI. Contribution à l'Analyse Bayésienne en Fiabilité des Systèmes Mécanique. Université des frères MENTOURI Constantine 2016.
- [89] Joel A. Nachlas, Reliability Engineering Probabilistic Models and Maintenance Methods, Taylor & Francis, 2005
- [90] Maxim Finkelstein, Failure Rate Modelling for Reliability and Risk, Springer, 2008
- [91] Malik MEGDICHE. Sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution en présence de production décentralisée. Sciences de l'ingénieur. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004.
- [92] Marvin RAUSAND, Arnljot HSYLAND. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. Published simultaneously in Canada 2004.
- [93] IGOR USHAKOV, PROBABILISTIC RELIABILITY MODELS, John Wiley, 2012
- [94] R. Doyle. "Mechanical reliability". In IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Tutorial notes, USA. 1992.
- [95] C. Lalanne, "Vibrations et chocs mécaniques", Tome 4: Dommage par fatigue. Hermes Science Publications, Paris., 1999
- [96] H. W. Grünling, K. Schneider et L. Singheiser, "Mechanical properties of coated systems". Materials Science and Engineering, 88:177–189, 1987.

- [97] Bernard, R. Analyses de sûreté de fonctionnement multi-systèmes. Université bordeaux 1, école doctorale de mathématiques et informatique, France 2009.
- [98] SINTEF, Offshore Reliability Data (OREDA), 5th edition, DNV, Norway (2009).
- [99] P. Lyonnet. Ingénierie de la fiabilité. Lavoisier, tec&doc edition, mars 2006.
- [100] L. Peyras. Diagnostic et analyse de risque liés au vieillissement des barrages, d' développement de méthodes d'aide à l'expertise. Blaise Pascal, Cleremont-Ferrand, 2002
- [101] R. Tassinari. Pratique de l'Analyse fonctionnelle. Dunod, 2003.
- [102] G. Zwingelstein. Diagnostic des défaillances - Théorie et pratique pour les systèmes industriels. Hermes, 1995.
- [103] A. Villemeur, "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : Fiabilité, Facteurs humains et Informatisation". Collection EdF - Ed Eyrolles. 1988.
- [104] A. Pages, and M. Gondran. "Fiabilité des systèmes". Ed Eyrolles. 1980.
- [105] Y. Mortureux. "La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques". Techniques de l'ingénieur, janvier 2005.
- [106] P. D. T. O'connor, A. Kleyner. "Practical reliability engineering", Fifth Edition, Wiley, 2012
- [107] J. Gaudibleux, "Contribution à l'évaluation de sûreté de fonctionnement des architectures de surveillance/diagnostic embarquées. Application au transport ferroviaire ». Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 201
- [108] Zachary TAYLOR, Subramanyam RANGANATHAN. Designing High Availability Systems: Design For Six Sigma and Classical Reliability Techniques with Practical Real-Life Examples. IEEE Press Editorial Board 2013
- [109] Jan Erik VINNEM. Offshore Risk Assessment: Principles, Modelling and Applications of QRA Studies. Springer, 1999.
- [110] Garin, H. AMDEC/AMDE/AEEL L'essentiel de la méthode. AFNOR, Paris (1994).
- [111] Laronde Rémi. Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables. Application à un système photovoltaïque. Thèse de doctorat, ANGERS (2011).
- [112] ROYER Michel. HAZOP : une méthode d'analyse des risques - Présentation et contexte. Techniques de l'Ingénieur, Septembre 2020.
- [113] Nehal, N., Lounis, Z., Bouhadiba, B., & Lounis, Z. (2023). Modelling of heating furnace fire scenarios using fault tree analysis, a bayesian network, and a thermal transfer method for

system reliability analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 83, 104995. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.104995>

[114] Walid MECHRI. Evaluation de la performance des Systèmes Instrumentés de Sécurité à paramètres imprécis. L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis 2011

[115] Y. Deng, H. Wang, and B. Guo, BDD algorithms based on modularization for fault tree analysis, *Prog Nucl Energy*. 85 (2015), 192–199.

[116] Islam H.M. Guetarni ,Nassima Aissani, Eric Châtelet, and Zoubida Lounis, Reliability Analysis by Mapping Probabilistic Importance Factors into Bayesian Belief Networks for Making Decision in Water Deluge System, *Process Safety Progress*, 2018

[117] N. Aissani and I.H.M. Guetarni, “From Centralized Modelling to Distributed Design in Risk Assessment and Industrial Safety: Survey and Proposition,” *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, T. Borangiu, A. Thomas, and D. Trentesaux, (Editors), Springer International Publishing, Cham (2015), pp. 125–134.

[118] J.K. Vaurio, Importance measures in risk-informed decision-making: Ranking, optimisation and configuration control, *Reliab Eng Syst Saf*. 96(11) (2011), 1426–1436.

[119] M. Rausand and A. Hoyland, *System Reliability Theory – Models, Statistical methods and Applications*, 2nd edition, Wiley Interscience, 2004

[120] Event Tree Analysis. (2005). In C. A. Ericson, *Hazard Analysis Techniques for System Safety* (p. 223-234). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471739421.ch12>

[121] Khan, F., Rathnayaka, S., & Ahmed, S. (2015). Methods and models in process safety and risk management : Past, present and future. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 116-147. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.005>

[122] CHEBILA Mourad. Modélisation et Evaluation des Performances des Systèmes Instrumentés de Sécurité avec Prise en Compte des Incertitudes. Université El-Hadj Lakhdar Batna, Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle, Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle (LRPI), 2015.

[123] RUBINO, G., & TUFFIN, B. (2007). Simulations et méthodes de Monte Carlo. In *Techniques de l'ingénieur Mathématiques: Vol. base documentaire : TIP052WEB*. (Numéro ref. article : af600). Editions T.I. <https://doi.org/10.51257/a-v1-af600>

[124] Merle, G., Roussel, J.-M., Lesage, J.-J., Perchet, V., & Vayatis, N. (2016). Quantitative Analysis of Dynamic Fault Trees Based on the Coupling of Structure Functions and Monte Carlo Simulation : Quant. Anal. of DFTs Based on the Coupling of SF and MC Simulation. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(1), 7-18. <https://doi.org/10.1002/qre.1728>

- [125] A. Villemeur. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation. Eyrolles, Paris, 1988.
- [126] G. Zwingelstein. La maintenance basée sur la fiabilité - Guide pratique d'application de la RCM. Hermes, Paris, 1996.
- [127] LACROIX Jean. (2008). Chaînes de Markov. Techniques de l'ingénieur Mathématiques, base documentaire : TIP052WEB(ref. article : af612).
<https://doi.org/10.51257/a-v1-af612>
- [128] Pierre LADET. Réseaux de Petri. Techniques de l'Ingénieur. Avril, 1989. <https://doi-org.snd11.arn.dz/10.51257/a-v1-r7252>
- [129] Abdelhak MKHIA. Contribution à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes instrumentés de sécurité intégrant de l'intelligence. Institut National Polytechnique de Lorraine – INPL 2008.
- [130] MOHAMED SALLAK. Evaluation de paramètres de sûreté de fonctionnement en présence d'incertitudes et aide à la conception : Application aux Systèmes Instrumentés de Sécurité. Institut National Polytechnique de Lorraine – INPL 2007
- [131] Peterson, J. L. (1977). Petri Nets. ACM Computing Surveys, 9(3), 223-252. <https://doi.org/10.1145/356698.356702>
- [132] SIGNORET, J.-P. (2008). Analyse des risques des systèmes dynamiques : Réseaux de Petri Principes. In Techniques de l'ingénieur Sécurité et gestion des risques: Vol. base documentaire : TIP112WEB. (Numéro ref. article : se4072). Editions T.I.
<https://doi.org/10.51257/a-v1-se4072>
- [133] A. Mihalache. Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : Application sur systèmes embarqué. PhD thésis, ISTIA - Université d'Angers, 2007
- [134] Michel ROYER. HAZOP : une méthode d'analyse des risques - Présentation et contexte. Techniques de l'ingénieur. Mars 2012.
- [135] Bilal Zerouali. Analyse du comportement de systèmes industriels par les réseaux bayésiens pour la prévention des scénarios indésirables, université Badji Mokhtar –Annaba, février 2018.
- [136] Delvosalle, C., Fievez, C., Pipart, A., & Debray, B. (2006). ARAMIS project: a comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. Journal of Hazardous Materials, 130(3), 200-219.

- [137] Pearl, J. (1986). Fusion, propagation, and structuring in belief networks. *Artificial Intelligence*, 29(3), 241–288. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(86\)90072-X](https://doi.org/10.1016/0004-3702(86)90072-X)
- [138] Roland Donat. Modélisation de la fiabilité et de la maintenance par modèles graphiques probabilistes Application à la prévention des ruptures de rails, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, novembre 2009.
- [139] Abdelaziz Zaidi, Intégration des réseaux bayésiens et bond graphs pour la supervision des systèmes dynamiques, Université Lille1, 2012
- [140] Aurélie LEGER. Contribution à la formalisation unifiée des connaissances fonctionnelles et organisationnelles d'un système industriel en vue d'une évaluation quantitative des risques et de l'impact des barrières envisagées. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2009
- [141] Norman FENTON, Martin NEIL. Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks. 2013.
- [142] Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2013). Quantitative risk analysis of offshore drilling operations : A Bayesian approach. *Safety Science*, 57, 108-117.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.01.022>
- [143] Pitpitt. Inférence bayésienne—DataFranca. Consulté 9 avril 2023, à l'adresse https://datafranca.org/wiki/Inf%C3%A9rence_bay%C3%A9sienne
- [144] Kevin Patrick MURPHY. Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning. University of California, Berkeley Fall 2002.
- [145] Patrick Naïm, Réseaux bayésiens, eyrolles, 2007
- [146] Murphy, Kevin Patrick. Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning. University of California, Berkeley 2002.
- [147] Florence PETIET. Réseau bayésien dynamique hybride : application à la modélisation de la fiabilité de systèmes à espaces d'états discrets. Université Paris-Est, juillet 2019.
- [148] Mariapia LAMPIS. Application of Bayesian Belief Networks to System Fault Diagnostics. Loughborough University Institutional Repository 2010.
- [149] M. Lampis and J.D. Andrews, Bayesian belief networks for system fault diagnostics, *Qual Reliab Eng Int.* 25(4) (2009), 409–426.
- [150] P. Weber, G. Medina-Oliva, C. Simon, and B. Iung, Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas, *Eng Appl Artif Intell.* 25(4) (2012), 671–682

- [151] A. Bobbio, L. Portinale, M. Minichino, and E. Ciancamerla, "Comparing fault trees and Bayesian networks for dependability analysis," *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 310–322, 1999.
- [152] A. Bobbio, L. Portinale, M. Minichino, and E. Ciancamerla, "Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 71, no. 3, pp. 249–260, 2001
- [153] Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Safety analysis in process facilities : Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering & System Safety* 2011;96(8):925 932. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.03.012>
- [154] Lampis M, Andrews J.D. Bayesian belief networks for system fault diagnostics : bayesian belief networks for system fault diagnostics. *Quality and Reliability Engineering International* 2009;25(4):409 426. <https://doi.org/10.1002/qre.978>
- [155] Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Aliabadi M.M, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of Hazardous Materials* 2017;321:830 840. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.074>
- [156] Yuan C, Cui H, Tao B, Ma S. Cause factors in emergency process of fire accident for oil–gas storage and transportation based on fault tree analysis and modified Bayesian network model. *Energy & Environment* 2018;29(5):802 821. <https://doi.org/10.1177/0958305X18760222>
- [157] Uusitalo L (2007) Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecol Model* 203 (3–4):312-318.
- [158] Kontkanen P, Myllymäki P, Silander T, Tirri H Comparing predictive inference methods for discrete domains. In: *Proceedings of the sixth International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics*, Ft. Lauderdale, USA, 1997. pp 311-318.
- [159] Sousa RL, Einstein HH (2012) Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study. *Tunn Undergr Sp Tech* 27 (1):86- 100.
- [160] Khaldoun AL AGHA, Daniel ETIEMBLE. Introduction à l'Internet des Objets. *Techniques de l'ingénieur*, mars 2021.

Annexe A

Calcule thermique suivant la méthode Lobo Evans

Tableau A.1. Epaisseur équivalente de la couche de gaz l_e

EPAISSEUR UTILE DE LA COUCHE DE GAZ	
Rapport des dimensions du four	Epaisseur L
<p><u>Fours cabine</u></p> <p>Longueur x largeur x hauteur (dans un ordre quelconque)</p> <p>1 x 1 x 1 à 1 x 1 x 3 1 x 2 x 1 à 1 x 2 x 4 1 x 1 x 4 à 1 x 1 x ∞ 1 x 2 x 5 à 1 x 2 x ∞ 1 x 3 x 3 à 1 x ∞ x ∞</p> <p><u>Fours cylindriques</u></p> <p>Diamètre x hauteur</p> <p>1 x 1 1 x 2 à 1 x ∞</p>	<p> $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \frac{2}{3} \sqrt[3]{\text{volume du four}}$ </p> <p>1 fois la plus petite dimension 1,3 fois la plus petite dimension 1,8 fois la plus petite dimension</p> <p>2/3 - diamètre 1 fois le diamètre</p>

Tableau A.2. Débits de la charge en fonction du taux de charge équivalent

Unité	produit	Taux de charge	120%	110%	100%	90%	80%	70%	60%
distillation sous vide U21	BRA	Débit (KL/h)	58,8	53,9	51-49	44,1	39,2	36-34,3	29,4

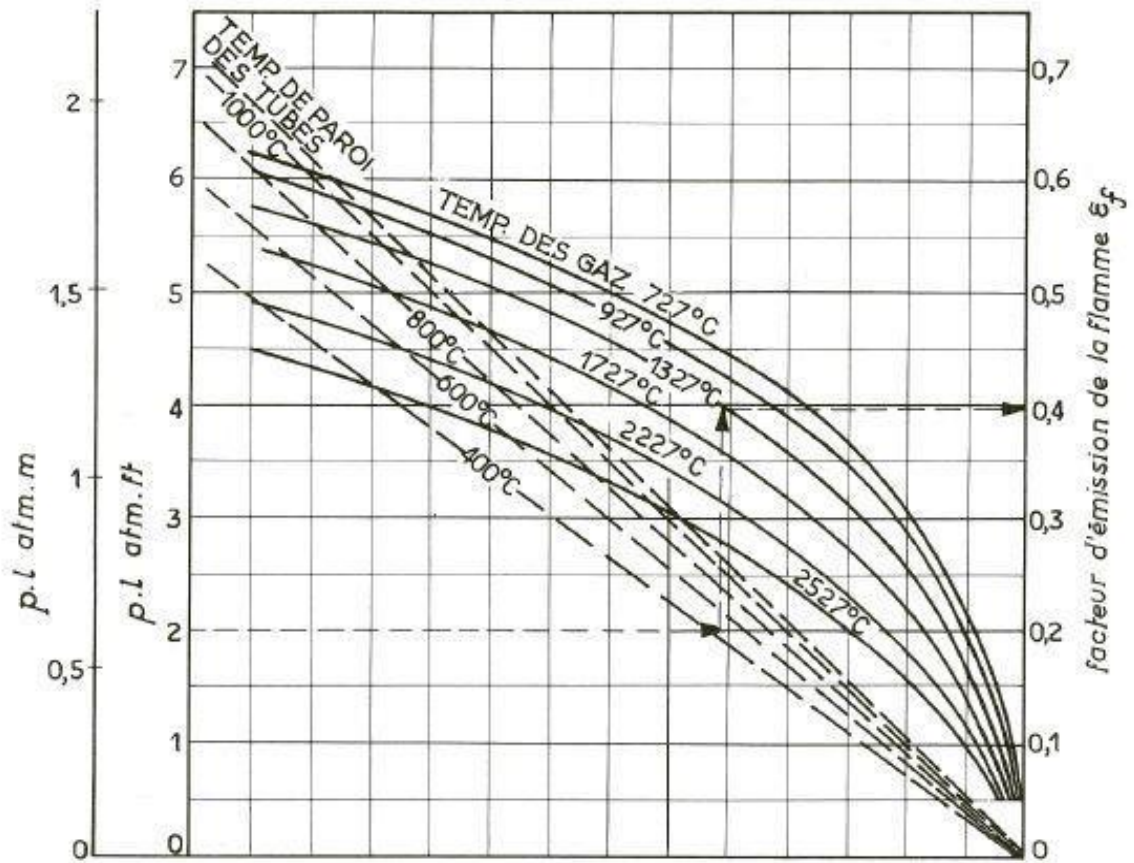


Figure A.1. Emissivité brute des gaz

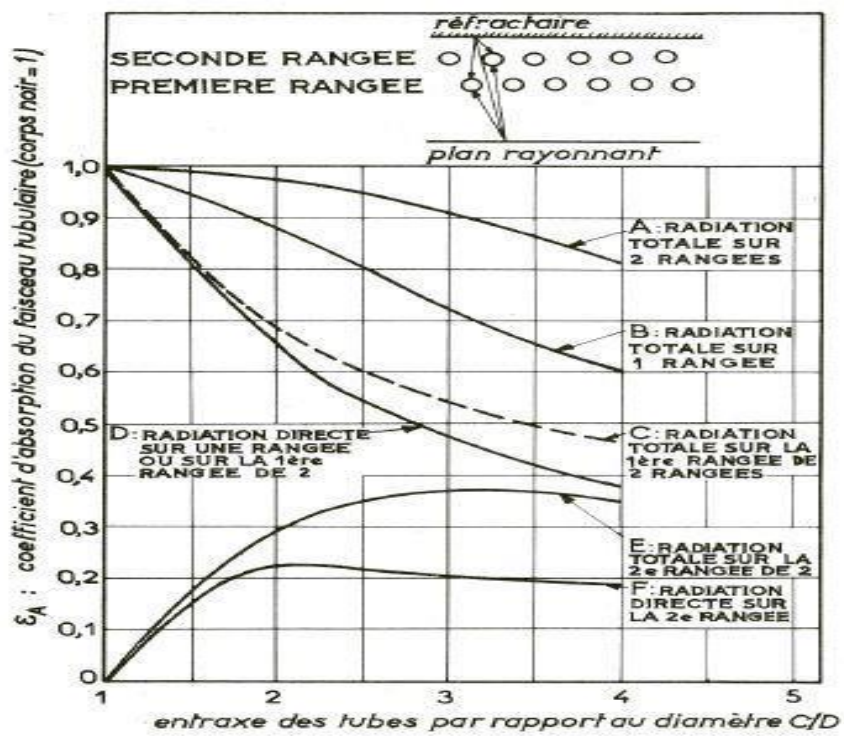


Figure A.2. Coefficient d'absorption du faisceau tubulaire α

Tableau A.3. Historique de l'inspection du four sous vide 21F1 au fil du temps

Date	Constatations	Recommandations
13/05/77	Présence de caniveau jusqu'à 2 mm	Réparation par soudage des tubes 55, 59, 38 et 39, 60. (meulage, préchauffage 250° à 300°, soudure et traitement thermique chauffe 750° ± 25°)
19/07/79	Le dumper de la cheminée est déformé	Redresser le dumper. Réparation du réfractaire.
09/02/80	Détérioration du TIS 5.	Changement complet du TIS 5.
11/11/83	Découpage des guides des tubes 9 et 10.	Nettoyage des gaines du four et soudage des deux guides (avec traitement thermique).
29/02/84	Faible fléchissement sans importance des tubes: 1 ^{ère} passe : 13, 19, 25, 27, et 2 ^{ème} passe : 1, 6, 9, 26, présence d'oxyde de fer de couleur noir au niveau de la zone de convection (cône) sur la paroi extérieure des tubes N° 10 à 19 de la 1 ^{ère} passe et N°12 à 19 de la 2 ^{ème} passe. .	Procéder à un décocking des tubes dans le prochain arrêt.
05/01/85	Légère déformation des tubes : ✓ 1 ^{ère} passe : 13, 19, 25, 27. ✓ 2 ^{ème} passe : 1, 6, 9, 26.	Contrôle par ultra son et dureté des tubes. Faire un suivi des tubes de four
08/11/87	Oxydation à haute température des tubes au niveau de la zone de convection.	Contrôle des épaisseurs des tubes, test de dureté et répliques métallographiques.
27/06/90	✓ Présence d'une couche d'oxyde de fer sur paroi externe des tubes en zone de convection. ✓ Détérioration du TIS 6 de la 2 ^{ème} passe.	✓ Brossage des tubes externes. ✓ Contrôle des épaisseurs des tubes, test de dureté et répliques métallographiques. ✓ Changement du TIS 6.
26/06/92	Présence d'une couche d'oxyde de fer sur paroi externe des tubes en zone de convection.	Brossage des tubes externes. Contrôle des épaisseurs des tubes, test de dureté et répliques métallographiques.
04/09/95 10/11/96 07/07/01	Oxydation à haute température des tubes au niveau de la zone de convection. Présence d'une couche d'oxyde de fer sur paroi externe des tubes	✓ Brossage des tubes externes. ✓ Contrôle des épaisseurs des tubes, test de dureté et répliques métallographiques.

Date	Constatations	Recommandations
30/10/07	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Forte oxydation sèche concentrée sur les parois externes des tubes 4'', 6'' et 8''. ✓ Dégradation très avancée des ailettes par carburation. ✓ Ecaillage des tubes suivis d'une couleur bleu au niveau de la partie supérieure des tubes. ✓ Déformation des tubes par fluage constaté au niveau des deux serpentins, particulièrement sur les tubes N°13 et 14 de la 1^{ère} passe et sur les tubes N°28 et 32 de la 2^{ème} passe. 	<p>Afin de réaliser un diagnostic approfondi et détaillé pour estimer le degré de dégradation des tubes et la durée de vie restante. Il est impératif de procéder à un test destructif qui a été recommandé lors des arrêts précédents.</p> <p><u>Compte tenu des anomalies constatées et notamment :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ la carburation des ailettes de la zone de convection. ✓ dépôt de coke sur paroi interne des tubes (déceler par RT). ✓ Déformation des tubes par fluage. ✓ présence de structure métallographique surchauffée. ✓ diminution de la dureté des tubes provoquant la dégradation des autres caractéristiques notamment la résistance à la rupture. ✓ Il est résulté que les tubes du four ont subi un vieillissement thermique après une globale des caractéristiques mécaniques. <p>A cet effet, le four ne peut être exploité dans ces conditions optimales de service. Ainsi nous recommandons le retubage du four dans immédiat.</p>
17/05/09	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Forte oxydation concentrée sur les parois externes des tubes 4'', 6'' et 8'' au niveau de la zone de rayonnement du four. ✓ Forte dégradation par oxydation des ailettes ce qui diminue la surface d'échange thermique et ainsi le rendement du four. ✓ Ecaillage important des tubes suivis d'une couleur bleu au niveau de la partie supérieure des tubes. ✓ Forte déformation par flexion des tubes. ✓ Présence d'une couche de dépôt d'oxyde sur la sole du four due à l'écaillage des tubes. ✓ Cisaillement et déformation des supports guides des tubes. 	<p>Vu l'état de dégradation et vieillissement des tubes après presque 350 000 hrs de marche, le four nécessite une exploitation rationnelle afin de prolonger au maximum, sa durée de vie dans les meilleurs conditions de sécurité et éviter toutes complications supplémentaires, à cet effet, le four ne peut être exploiter dans les conditions de service maximum du désigne cela peut diminuer considérablement la durée de vie par la perte en continue des caractéristiques mécaniques sous l'effet du fluage thermique.</p> <p>En toute fin utile, la planification dans le court terme de la rénovation des serpentins du four est indispensable.</p>

Date	Constatations	Recommandations
05/12/04	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Encrassement des gaines de guides tube. ✓ Présence une couche d'oxyde de fer sur paroi externe des tubes. ✓ Oxydation très avancée des tubes au niveau de la zone de convection. ✓ Dégradation très avancée des tubes à ailettes qui ont subi une déformation permanente causée par la haute température. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inspection des TIS. ✓ Brossage et nettoyage des tubes externe. ✓ Nettoyage des gaines des tubes. ✓ Contrôle des épaisseurs des tubes, test de dureté et répliques métallographiques.
10/04/06	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dégradation très avancée des tubes à ailettes causée par la haute température. ✓ Dilatation permanente des tubes. ✓ Cisaillement et déformation des supports guides causé par la dilatation permanente. 	<p>Contrôle des épaisseurs des tubes, test de dureté et répliques métallographiques. Afin d'estimer le degré de dégradation des tubes ; il est impératif de procéder à un test destructif lors du prochain arrêt annuel.</p> <p>Vu l'aspect visuel et les tests de résonance des tubes, ils ont recommandé à un contrôle par radiographie afin de quantifier le dépôt et l'état interne des tubes.</p>
23/10/07	<p>Pour mieux cerner le problème de préchauffe des tubes du four 21F1, il a été effectué un test de radiographie sur les tubes pour quantifier l'ampleur de la couche de coke à l'intérieur des tubes.</p>	<p>La radiographie a révélé une couche de coke adhérente sur les parois interne des tubes du four cette couche difficilement quantifiable a tendance d'augmenter.</p>

Annexe B

Principales lois de probabilité et bases de données pour la sûreté de fonctionnement

Sommaire de l'Annexe :

B.1.Principales lois de probabilité au profit de la fiabilité	289
B.1.1. Loi exponentielle.....	289
B.1.2. Loi de Weibull.....	289
B.1.3. Loi normale	290
B.1.4. Loi log-normale ou loi de Galton.....	290
B.1.5. Loi uniforme.....	291
B.2. Bases de données pour la sûreté de fonctionnement.....	291
B.3. Restrictions liées à l'utilisation des bases de données.....	293

B.1.Principales lois de probabilité au profit de la fiabilité

De nombreux domaines scientifiques et techniques emploient les lois de probabilité en tant qu'outils fondamentaux afin de modéliser et de mieux comprendre le comportement des phénomènes à caractère aléatoire. En fiabilité, ces règles sont appliquées afin d'évaluer la durée de vie et la probabilité de défaillance des systèmes et des équipements.

Mieux comprendre la distribution de probabilité des événements aléatoires qui pourraient survenir dans un système ou un équipement est essentiel si on veut évaluer la fiabilité de ce dernier. L'examen des données de fiabilité dans les différentes disciplines fait généralement appel à des lois de probabilité, qui sont des modèles mathématiques caractérisant ces distributions de probabilité. Nous nous concentrerons plus particulièrement sur les lois continues. Nous allons énumérer les principales caractéristiques de ces lois, y compris le taux de défaillance, les fonctions de fiabilité et la densité de probabilité.

B.1.1. Loi exponentielle

La loi exponentielle décrit le mieux la période pendant laquelle le taux de défaillance des équipements qui sont confrontés à des défaillances inattendues ont un taux de défaillance constant, ou défaillance aléatoire. Le taux de défaillance représente la période de temps entre deux défaillances, ou le délai avant la défaillance. Le taux de défaillance est un paramètre unique qui le définit. Elle se démarque par :

$$\text{La fiabilité : } R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\text{La densité de probabilité : } f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$\text{Le taux de défaillance : } \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda$$

$$\text{La durée de vie moyenne ou MTTF : } MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

Par conséquent, le taux de défaillance reste constant, ce qui veut dire que la loi exponentielle modélise la durée de vie des systèmes qui ne se dégradent pas ou ne s'améliorent pas avec le temps.

B.1.2. Loi de Weibull

Ce type de loi est très répandu pour décrire le cycle de vie des composants selon la valeur du paramètre de forme β .

$\beta < 1$ ($\lambda(t)$ diminue) : phase de jeunesse (rodage, déverminage)

$\beta = 1$ ($\lambda(t)$ constant) : absence du temps.

$\beta > 1$ ($\lambda(t)$ augmente) : phase de vieillissement, dégradation.

La loi de Weibull est caractérisée selon trois paramètres : η (paramètre d'échelle), β (paramètre de forme) qui reflète la finesse de la distribution et γ (paramètre de localisation). Elle est définie comme suit :

La densité de probabilité : $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$

La fiabilité : $R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$

Le taux de défaillance : $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$

La durée de vie moyenne ou MTTF : $MTTF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$

B.1.3. Loi normale

La loi normale (également appelée loi de Gauss) fait partie des lois de probabilité les plus connues, du fait qu'elle intervient dans de nombreux phénomènes. La loi normale est caractérisée notamment par la moyenne μ et l'écart-type σ .

La densité de probabilité : $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$

La fonction de répartition : $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$

La durée de vie moyenne ou MTTF : $MTTF = \mu$

B.1.4. Loi log-normale ou loi de Galton

Dans ce cas, la variable aléatoire devient une variable continue t comprise entre $[0$ et $+\infty]$ avec une loi de densité de probabilité définie de la manière suivante :

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Le taux de défaillance : $\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}}{t \int_0^\infty \sigma\sqrt{2\pi}f(t)dt}$

La durée de vie moyenne ou MTTF : $MTTF = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$

B.1.5. Loi uniforme

Une distribution uniforme sur $[0, a]$ présente une densité de probabilité et une fiabilité qui sont exprimées par les expressions ci-dessous :

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{a} & \text{si } 0 \leq t \leq a \\ 0 & \text{si } t > a \end{cases}$$

De manière générale, la distribution de probabilité de la loi uniforme sur $[a, b]$ se définit comme suit :

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{si } a \leq t \leq b \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

La distribution gamma, la distribution gaussienne inverse et d'autres lois de probabilité sont également utilisées en fiabilité. Selon le type de données et les hypothèses pouvant être posées à propos de la distribution des variables aléatoires, la loi de probabilité la plus adaptée est choisie.

B.2. Bases de données pour la sûreté de fonctionnement

Les bases de données constituent un élément clé du recueil, de la gestion et de l'analyse des données relatives aux équipements et aux systèmes dans le domaine de la sûreté de fonctionnement. Les experts en fiabilité et en maintenance peuvent, grâce à ces bases de données, améliorer les performances de leurs équipements et de leurs systèmes, réduire les temps d'arrêt et les risques de pannes et de défaillances. Dans ce contexte, il est possible de classer les bases de données en trois catégories principales, selon leur objectif et leur contenu.

- Bases de données particulières à une entreprise ou un site industriel : il s'agit de données collectées à partir d'équipements similaires, exploités sous les mêmes conditions par l'entreprise.
- Les bases de données relatives à un secteur particulier, par exemple le nucléaire, la défense, etc., contiennent des données et des informations ayant trait à ce secteur. Ces bases de données, qui sont établies et maintenues par des organisations axées autour d'une industrie particulière, comprennent des données détaillées sur l'équipement, les systèmes, utilisés dans ce secteur.

- Bases de données à caractère générique : les données sont issues dans plusieurs secteurs d'activité et à partir de sources diverses. Elles possèdent souvent des expressions mathématiques comme les modèles de régression pour estimer par exemple des taux de défaillance.

Le tableau A.1 montre des bases de données de fiabilité ainsi que leur créateur. La principale information figurant dans ces bases de données est le taux de défaillance des composants.

Tableau A.1 Recueils de données de fiabilité

Bases de données	Créateur	Catégorie et commentaires
Onshore and offshore Reliability Data, OREDA	OREDA est un projet organisationnel sponsorisé par huit compagnies pétrolières et gazières opérant dans le monde entier.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Données relatives à l'industrie pétrolière ➤ Détail sur les modes de défaillance. ➤ MTTR.
Handbook of Reliability Prediction for Mechanical Equipment (2007)	NSWC (Naval Surface Warfare Center), USA	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Détail sur les modes de défaillance. ➤ Générique (éléments mécaniques) ➤ Formule des taux de défaillance.
EIREDA European Reliability Industry Data Handbook	EDF, Électricité de France est une société française publique chargée de la production et de la distribution d'électricité,	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Banque de données sur les paramètres de fiabilité des équipements électromécaniques.
EPRI (Electric Power Research Institute)	Organisation Américaine	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Spécialisée dans la production d'énergie électrique
BELLCORE5, Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment (1997)	Telcordia Technologies, compagnie américaine spécialisée dans les télécommunications	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Spécifique au secteur des télécommunications.
IEEE STD, Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association, IEEE500 (1991)	Organisation Américaine	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mesures spécifiques aux réacteurs nucléaires ➤ Le délai de réparation.

En outre, il existe d'autres bases de données adaptées à certains secteurs ou catégories de machines, telles que celles relatives aux automobiles, et aux avions. Les exigences particulières de l'utilisateur et de l'industrie concernée déterminent le choix de la base de données.

B.3. Restrictions liées à l'utilisation des bases de données

L'analyse de fiabilité dans une variété d'industries peut bénéficier de l'utilisation de bases de données, qui offrent des données de fiabilité sur les composants et les systèmes mécaniques. Toutefois, il faut souligner que ces bases de données sont soumises à certaines restrictions d'utilisation, à savoir :

- ✓ En général, les données sont issues de tests en laboratoire ou d'essais en service effectués dans des conditions prédéterminées, Bien qu'il soit difficile de tout prendre en compte, les mécanismes de dégradation des équipements (modes de défaillance, facteurs et origines), les conditions d'exploitation et le développement des technologies constituent un ensemble de données nécessaires pour calculer les taux de défaillance et créer des modèles de fiabilité prédictifs. Les données sont souvent inadaptées lorsqu'elles sont destinées à être utilisées dans des systèmes et des environnements réels, ou peuvent ne pas représenter correctement les conditions d'exploitation réelles. De ce fait, les résultats de ces bases de données requièrent une interprétation prudente.
- ✓ Il se peut que les données soient moins applicables à différents types de composants ou de systèmes, car elles sont souvent spécifiques à des types particuliers de composants ou de systèmes.
- ✓ Les données ayant pu être recueillies il y a plusieurs années et ne reflétant pas nécessairement les progrès actuels dans la conception et la fabrication des composants et systèmes mécaniques, elles peuvent être obsolètes ou inadaptées pour être utilisées dans des applications contemporaines.
- ✓ Les données risquent d'être biaisées par la sélection, vu que les composants ou les systèmes soumis à l'essai ont été choisis de façon non représentative.

En conclusion, bien que les bases de données mécaniques puissent être un outil efficace pour les études de fiabilité, il est essentiel de prendre en compte les contraintes liées à l'utilisation de ces bases de données ainsi que de les utiliser de manière appropriée et intelligente.

Annexe C

Aperçu sur les méthodes d'analyse prédictive

Sommaire de l'annexe:

C.1. Méthode AMDEC	295
C.1.1. Analyse des défaillances	295
C.1.2. Criticité des modes de défaillance.....	296
C.2. Méthode de l'arbre de défaillance	297
C.3. Etude HAZOP	298
C.3.1. Mots guides	299

C.1. Méthode AMDEC

La méthode AMDEC est fondée sur les notions de défaillance, de mode fonctionnel, de cause de défaillance, d'effet de mode de défaillance ainsi que de criticité.

On peut considérer le concept de causes de défaillance comme étant un ensemble d'événements qui mènent aux modes de défaillance.

On entend par effet d'un mode de défaillance toutes les conséquences qui se produisent quand une entité (un composant, un système, un équipement, etc.) est incapable d'accomplir une activité requise à la suite par exemple d'une défaillance ou d'une dégradation. Ces conséquences varient selon le type de fonction et le rôle occupé par cette entité dans l'ensemble du système.

C.1.1. Analyse des défaillances

Le fait de poser des questions à propos des fonctions du système, telles que " qu'est ce qui se passe si la fonction ne se réalise pas quand elle est sollicitée ?", "qu'est ce qui se passe si la fonction est exécutée de façon intempestive ?" ou bien " qu'est ce qui se passe si la fonction n'est plus du tout réalisée ?", a pour conséquence de définir les modes de défaillance d'un système. Ce type d'enquête aide à identifier au mieux les divers modes de défaillance susceptibles d'avoir un impact sur la fiabilité comme sur la sécurité d'un système.

La liste des modes de défaillance définis par la norme AFNOR est donnée dans le tableau C.1. Nous identifions pour chacun des modes de défaillance les causes qui peuvent en être à l'origine, puis les effets sur les fonctions principales du système ainsi que sur ses interfaces.

Tableau C.1 Différents modes de défaillance liés à l'origine du fonctionnement du système

Modes de défaillances	
1. Défaillance structurelle (rupture)	17. Ecoulement réduit
2. Blocage physique ou coincement	18. Mise en marche erronée
3. Vibrations	19. Ne s'arrête pas
4. Ne reste pas en position	20. Ne démarre pas
5. Ne s'ouvre pas	21. Ne commute pas
6. Ne se ferme pas	22. Fonctionnement prématuré
7. Défaillance en position ouverte	23. Fonctionnement après délai prévu (retard)
8. Défaillance en position fermée	24. Entrée erronée (augmentation)
9. Fuite interne	25. Entrée erronée (diminution)
10. Fuite externe	26. Sortie erronée (augmentation)
11. Dépasse la limite supérieure tolérée	27. Sortie erronée (diminution)
12. Est en dessous de la limite inférieure tolérée	28. Perte de l'entrée
13. Fonctionnement intempestif	29. Perte de sortie
14. Fonctionnement intermittent	30. Court-circuit (électrique)
15. Fonctionnement irrégulier	31. Circuit ouvert (électrique)
16. Indication erronée	32. Fuite (électrique)
	33. Autres conditions de défaillance exceptionnelles selon les propriétés du système étudié

C.1.2. Criticité des modes de défaillance

La criticité, également connue sous le nom de IPR (Indice de Priorisation du Risque), peut être évaluée à partir de la formule suivante :

$$C = F \times G \times N$$

Avec :

G : Gravité,

O : probabilité d'occurrence,

N : non détection

la notation de chaque critère peut être comprise entre 1 et 4 ou 10 ou autre. Ce classement est effectué par le groupe de travail pendant la phase initiale de l'étude. Le tableau C.2 présente un exemple de cote de 1 à 4. Plus la valeur de C est importante, plus la défaillance est critique. La figure C.2 ci-dessous résume les éléments contenus dans le tableau de l'AMDEC.

Tableau C.2 Exemple de cote de 1 à 4 selon la méthode AMDEC

COTE	Probabilité d'occurrence (O)	Gravité (G)	Non détection (N)
1	événement de nature très rare	Événement sans influence	événement détecter de manière certaine (très efficace)
2	évènement susceptible de se produire	Événement important	l'évènement décelable (efficace)
3	événement récurrent	Evènement critique	événement difficile à détecter (peu fiable)
4	événement très récurrent	Evènement catastrophique	événement non détectable

La criticité est fréquemment décrite sous la forme d'une matrice (grille de criticité) sur la base de deux critères de défaillance, à savoir la probabilité et la gravité.

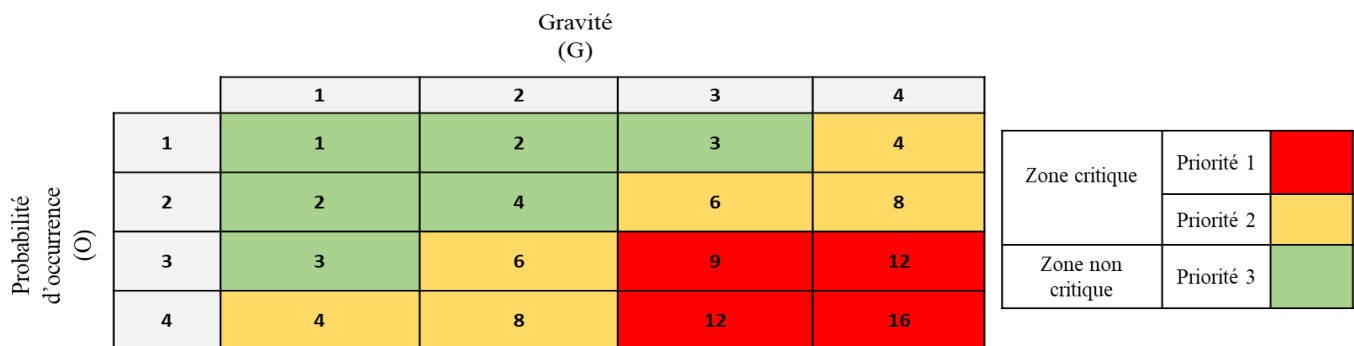


Figure C.1 Présentation d'une matrice de criticité

Figure C.2 Tableau général de l'AMDEC

N° de l'élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet sur le système ou/et sous-système	O	G	D	C (IPR)	Commentaires/ action corrective

C.2. Méthode de l'arbre de défaillance

Un arbre de défaillance représente graphiquement l'arbre généalogique. Il s'agit d'une méthode d'analyse des événements. L'arbre de défaillance est créé en identifiant l'ensemble des événements de base, ou des séquences d'événements, qui conduisent à une situation à risque. La structure de l'arbre de défaillance nécessite la présence de plusieurs éléments fondamentaux caractérisés par leurs symboles qui représentent chaque événement dans l'arbre, à savoir :

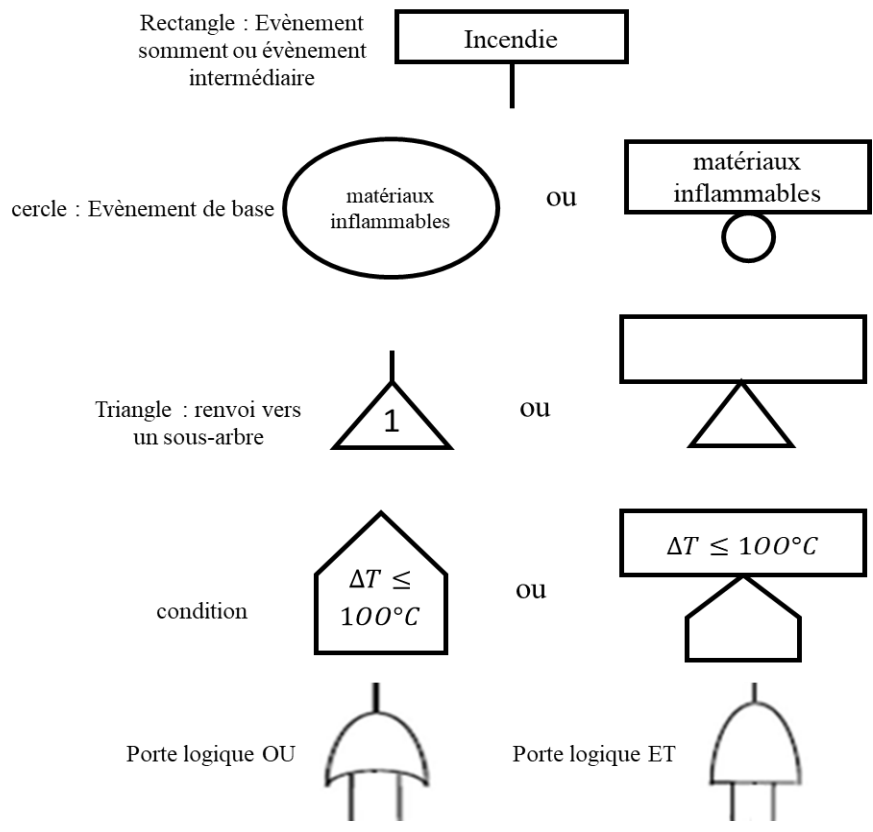


Figure C.3 exemple sur les éléments fondamentaux pour la création de la structure de l'arbre de défaillance

Le tableau C.3 qui suit résume certaines des principales règles de l'algèbre BOOLE :

Tableau C.3 Règles pour réduire les arbres de défaillance

propriétés	Produit « porte ET »	Somme « porte OU »
Commutativité	$A \cdot B = B \cdot A$	$A + B = B + A$
Idempotence	$A \cdot A = A$	$A + A = A$
Absorption	$A \cdot (A + B) = A$	$A + A \cdot B = A$
Associativité	$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$	$A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributivité	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$	$A + B \cdot C = (A + B) \cdot (A + C)$

C.3. Etude HAZOP

Une étude HAZOP sera effectuée sur un tableau correspondant au modèle mentionné ci-dessous.

Tableau C.4 Worksheet (feuille de travail) HAZOP

Titre de l'étude HAZOP								Feuille : 01	
Schéma N° :				Révision N° :				Date :	
Composition du Groupe :								Date de la réunion :	
N°	GuideWords	Elément Déviation	Causes probables	Conséquences	Mesures de contrôle	Commentaire	Actions	N° de l'action	Responsable de l'action
1									
2									

C.3.1. Mots guides

Le principe de cette démarche réside dans un ensemble de sept mots-clés qui sont appliqués à tous les paramètres essentiels du procédé étudié dans le but de déterminer les déviations vis-à-vis de son objectif de conception. Une déviation est une association d'un mot-guide et d'un paramètre - par exemple, une déviation est consignée en tant que « Pas de débit ». Si le mot-guide "Non" est attribué au paramètre "Débit". Les sept mots-clés de base apparaissent dans le tableau C.5.

Tableau C.5 Guide words de base pour l'HAZOP

Guide-words	sens	commentaire
(PAS DE) NO, NOT or NONE	Négation catégorique des intentions de conception	Aucun partie des intentions n'est atteinte et rien d'autre ne se passe. Ex: Absence de debit.
(PLUS de) MORE OF	Augmentations quantitatives de tous les paramètres physiques pertinents	Celle-ci se réfèrent à des quantités + propriétés physiques pertinentes telles que les débits et les températures ainsi que des activités telles que « CHALEUR » et « REACTION »
(MOINS de) LESS OF	Diminution quantitative de tous les paramètres physiques pertinents	Celle-ci se réfèrent à des quantités + propriétés physiques pertinentes telles que les débits et les températures ainsi que des activités telles que « CHALEUR » et « REACTION »
(AUSSI BIEN QUE) AS WELL AS	Augmentation qualitative	Toutes les intentions de conception et d'exploitation sont atteintes avec une activité supplémentaire. Ex: présence d'impurtés
(PARTIE DE) PART OF	Diminution qualitative	Seules certaines des intentions sont atteintes. Ex: changement dans la composition d'un fluide
(INVERSE) REVERSE	Opposé logique de l'intention	Ceci est principalement applicable aux activités par exemple, flux inverse ou réaction chimique. Il peut également être appliqué à des substances, par ex. 'POISON' au lieu de 'ANTIDOTE' ou 'R' au lieu des isomères optiques 'S'.
(DIFFERENT) OTHER THAN	Substitution totale	Aucune partie de l'intention originale n'est atteinte. Quelque chose de différent se produit. Ex: Démarrage et arrêt intempestifs