الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème :

L'analyse de l'Emballement thermique (étude de cas Raffinerie d'Arzew)

Présenté et soutenu publiquement par :

Gada Mohammed Abderrahmane & Benko Mohamed

Le 20 juin 2026

Devant le jury composé de

Nom et prénom	Qualité	Grade	Etablissement
Aouimeur Yamina	Présidente	MCB	IMSI
Benomar Fatima	Directrice du mémoire	MCB	IMSI
Lebsir Hayet	Examinatrice	Professeur	IMSI

2025/2026

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer :

Nos louanges à Dieu, le tout puissant pour nous avoir armés de foi et de patience afin d'accéder aux études supérieures et de les achever. Aussi pour nous avoir donnés la force et la confiance pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier d'abord tous nos professeurs du cursus universitaire. Notre profonde reconnaissance et indéfectible gratitude à notre encadrante Mme BENOMAR qui était la source de notre inspiration du sujet de mémoire de fin d'étude ; qui nous a orientés et soutenus avec rigueur à son élaboration.

Nos remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Un grand merci à et gratitude à nos familles pour leurs dévouements et sacrifices, à nos amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.

Merci à tous

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À nos très chers parents,
pour leur amour, leur patience, leurs sacrifices et leurs encouragements tout au long de nos études.

À la mémoire de la grand-mère
que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis. Son souvenir restera gravé dans nos cœurs.

À nos familles et proches,
pour leur soutien moral et leurs conseils précieux.

À nos enseignants,
pour leur accompagnement, leur disponibilité et les connaissances qu'ils nous ont transmises.

À nos amis et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire

Résumé

Ce travail a été axé sur l'étude de l'emballement thermique et ses différents types. Il porte principalement sur l'emballement thermique des réacteurs, ainsi que ses causes, ses conséquences et les risques associés à ce phénomène dans l'industrie, ces impact . Cette étude présente également les principaux accidents industriels survenus au cours de l'histoire industrielle.

Par ailleurs, plusieurs méthodes d'analyse des risques ont été étudiées, notamment l'HAZOP, l'APR, l'AMDEC, l'ADD et le réseau bayésien, en mettant en évidence leurs rôles, leurs avantages et leurs limites. Les méthodes les plus appropriées pour cette étude se sont révélées être l'ADD et le réseau bayésien.

L'application pratique a été menée au sein de la raffinerie d'Arzew, au niveau de l'unité d'extraction au furfural de la zone de reformage catalytique. Un modèle d'Arbre de Défaillance a été élaboré afin d'identifier les combinaisons de défaillances susceptibles de conduire à un emballement thermique. Ce modèle a ensuite été converti en Réseau Bayésien permettant l'évaluation quantitative des probabilités d'occurrence des événements élémentaires et de l'événement sommet. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les barrières de sécurité les plus critiques et de proposer des mesures de prévention et de protection visant à améliorer la maîtrise des risques liés à l'emballement thermique et à renforcer la sécurité des procédés industriels.

الملخص

يركز هذا العمل على دراسة ظاهرة الانفلات الحراري وأنواعه المختلفة، حيث يتناول بشكل أساسي الانفلات الحراري في المفاعلات، إضافةً إلى أسبابه ونتائجه والمخاطر المرتبطة به في المجال الصناعي. كما تعرض هذه الدراسة أهم الحوادث الصناعية التي شهدها تاريخ الصناعة.

والشبكات ADDو AMDECو APRو HAZOP إلى جانب ذلك، تم دراسة عدة طرق لتحليل المخاطر، من بينها ADD البايزية، مع توضيح أدوارها ومزاياها وحدودها. وقد تبيّن أن أكثر الطرق ملاءمة لهذه الدراسة هما طريقة والشبكة البايزية .

بالتحديد في وحدة الاستخلاص بالفورفورال ضمن منطقة أرزيو أما الدراسة التطبيقية فقد أُجريت على مستوى مصفاة والشبكة البايزية لتحليل النتائج المتحصل عليها وتقييم المخاطر المرتبطة ADD الإصلاح الحفزي. وقد تم تطبيق طريقتي ظاهرة الانفلات الحراري .

Summary

This work focused on the study of thermal runaway and its different types. It mainly deals with thermal runaway in reactors, as well as its causes, consequences, and the risks associated with this phenomenon in industry. The study also presents the major industrial accidents that have occurred throughout industrial history.

In addition, several risk analysis methods were studied, including HAZOP, APR, AMDEC, ADD, and Bayesian networks, highlighting their roles, advantages, and limitations. The most appropriate methods for this study were found to be the ADD method and Bayesian networks.

The case study was carried out at the refinery of Arzew, specifically in the furfural extraction unit of the catalytic reforming area. The ADD method and Bayesian networks were applied to analyze the obtained results and assess the risks related to thermal runaway.

Table des matières

Résumé 571
Introduction générale 2
Définition 2
Qu’est-ce que le risque d’emballement thermique ? 3
Scénarios pouvant conduire à un emballement thermique : 3
Les types d’emballement thermique 4
Emballement thermique dû à une réaction chimique exothermique 4
Emballement thermique par décomposition auto-accélérée 4
Emballement thermique dû à une défaillance du système de refroidissement 5
Emballement thermique d’origine électrique 5
Emballement thermique dans les batteries industrielles 5
Emballement thermique par auto-échauffement (combustion spontanée) 6
Réacteur chimique 6
Définition 6
Types de réacteurs chimiques 6
Les phases de l’emballement thermique dans un réacteur chimique 7
Les principaux risques liés à l’emballement thermique 7
Risques thermiques 7
Risques de surpression 7
Risques d’explosion 8
Risques d’incendie 8
Risques toxiques 9
Risques environnementaux 9
Risques pour les travailleurs 9
Risques économiques 9
Des catastrophes causées par l’emballement thermique 10
Bhopal 10
Quel produit chimique s’est échappé lors de la catastrophe de Bhopal ? 10
Pourquoi l’usine de Bhopal a-t-elle explosé ? 10
L’usine de Bhopal présentait : 10
Explosion de l'usine AZF de Toulouse 11
Catastrophe de Seveso 11

Catastrophe de Flixborough 12
Retours d'expérience 13
Causes de l'emballement thermique 14
Causes techniques 14
Causes humaines 15
Causes chimiques 15
Causes opérationnelles 15
Conséquences de l'emballement thermique 15
Conséquences techniques 15
Conséquences humaines 16
Conséquences environnementales 16
Conséquences économiques 16
Appareils de mesure des paramètres thermique et cinétique 16
Appareils de mesure des phases d'emballement thermique 17
Conclusion : 17
1. Introduction : 19
Définition : 19
Principes pour la gestion des risques : 19
L'analyse des risques : 19
Définition : 19
Approche de l'analyse des risques : 20
Synthèse et conclusions : 20
Critères de choix des méthodes : 21
Méthode HAZOP : 21
Objectifs 21
APR 22
Principe 23
Limites et avantages 23
ADD 23
Principe : 24
Avantage et limite : 24
Avantage : 24
Limite : 24

AMDEC 25
Conclusion : 26
1. Introduction : 27
Définition de réseau bayésien : 27
Présentation de AgenaRisk : 28
Objectif d'utilisation : 28
Domaine d'utilisation : 28
Secteur de l'industrie : 28
Problèmes critiques d'entreprise et de sécurité : 28
Utilisation des Réseaux Bayésiens 31
Limites des Réseaux Bayésiens 32
Convertir l'AdD en RB 34
Conclusion : 35
1. Présentation de la raffinerie d'Arzew : 37
Liste des raffineries d'Algérie : 37
Historique de la raffinerie d'Arzew : 37
Situation géographique : 37
Capacités de production : 38
L'objectif du complexe : 39
2. Présentation de la principale installation de RA1Z : 40
Partie pratique 42
3. Le reformage catalytique : 42
Principe Au cours des quatre dernières décennies : 42
Les différentes réactions mises en jeu 43
Déshydrogénation des naphtènes en HC aromatiques 43
Deshydrocyclisations des Paraffines 43
4. Le procède de reformage catalytique semi régénératif 44
5. Pourquoi réseau bayésien et ADD 44
Construction de l'arbre de défaillance 45
Résultats et discussion 47
Construction du réseau bayésien 48
Définition des nœuds 48
Les calculs des probabilités par la modélisation de RB : 49

Discutions des résultat de réseau bayésien 49
Conclusion 50
Comparaison des ADD avec les RB 50
Les mesures de prévention et de protection 50
Autre mesure de prévention et protection 50
Les mesures préventives 50
Conception intrinsèquement plus sûre : 51
Évaluation des risques : 51
Formation et procédures de sécurité : 51
Planification des mesures d'urgence 51
Plan d'intervention d'urgence : 51
Équipement d'urgence : 51
Exercices et formations réguliers : 51
Mesure de protection 52
Systèmes instrumentés de sécurité (SIS) : 52
Systèmes de refroidissement : 52
Agitation et mélange : 52
Soupapes de sûreté et disques de rupture : 52
Inertage : 52
Injection de fluides de trempe : 52
Systèmes déluge d'eau : 52
Conclusion : 53
Conclusion générale 53

Liste des figures

Figure 1: les phases d'emballement thermique 7
Figure 2 : accident de Bhopal (inde) 1984 11
Figure 3 : accident de Seveso 12
Figure 4 : exemple d'un réseau bayésien présenté sur AgenaRisk 29
Figure 5 : l'accès aux propriétés des nœuds sur agenarisk 30
Figure 6 : importation d'un fichier Exel sur agenarisk 31
Figure 7 : tendance d'utilisation des réseaux bayésiens dans l'analyse des risques 33
Figure 8 : Organigramme représentant un algorithme simplifie pour représenter un AdD en RB 34
Figure 9 : Structure du réseau bayésien 35
Figure 10 : station raffinerie des Arzew 38
Figure 11:Capacité de production au complexe 39
Figure 12 procède du reformage catalytique 44
Figure 13 : arbre de défaillance d'un événement redoute emballement thermique 45
Figure 14 : réseau bayésien 48

Liste des tableaux

Tableau 1 : méthode HAZOP 22
Tableau 2 méthode AMDEC 25
Tableau 3 définition des nœuds 48
Tableau 4 : probabilité d'apparition de la composante 49

Liste des abréviations

ADD (ou AdD) : Arbre de Défaillance.

FMA / FTA : Fault Tree Analysis (nom anglais de l'Arbre de Défaillance)

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité.

FMEA : Failure Mode and Effects Analysis (nom anglais de l'AMDEC).

HAZOP : Hazard and Operability study (Analyse des risques et de l'exploitabilité).

APR : Analyse Préliminaire des Risques.

LOPA : Layer Of Protection Analysis (Analyse des barrières de protection).

RB : Réseau Bayésien.

SIS : Système Instrumenté de Sécurité.

G / P / D / C : Gravité / Probabilité (ou Occurrence) / Détection / Criticité (indicateurs de la méthode AMDEC).

DSC : Differential Scanning Calorimetry (Calorimétrie différentielle à balayage).

RC1 : Calorimètre réactionnel à l'échelle du laboratoire.

ARSST : Advanced Reactive System Screening Tool (Calorimètre de caractérisation de la violence des réactions).

VSP II : Vent Sizing Package II (Calorimètre adiabatique pour le dimensionnement des évents/disques de rupture).

CSTR : Continuous Stirred Tank Reactor (Réacteur chimique à cuve agitée en continu).

PFR : Plug Flow Reactor (Réacteur à flux piston).

SADT : Self-Accelerating Decomposition Temperature (Température de décomposition auto-accélérée).

GPL / LPG : Gaz de Pétrole Liquéfié.

MIC : Isocyanate de Méthyle (produit chimique de la catastrophe de Bhopal).

AZF : Azote Fertilisants (Usine de Toulouse).

NO : Nombre d'Octane (ou Indice d'Octane).

HC : Hydrocarbures.

NL : Naphta Lourd.

NG / LG : Naphta Léger.

BRA : Résidu Atmosphérique (Brut Réduit Atmosphérique)

BRI : Brut Réduit Importé.

RSV : Résidu Sous Vide.

VGO : Vacuum Gas Oil (Gasoil sous vide).

SPO : Spindle Oil (Huile lubrifiante de type Spindle).

MVH : Huiles mi-visqueuses.

VO : Huiles visqueuses.

DAH : Huile désasphaltée (Deasphalted Oil).

BTS : Basse Teneur en Soufre (Fioul BTS).

HTS : Haute Teneur en Soufre (Fioul HTS).

RIA : Robinet d'Incendie

Introduction générale

Le développement industriel moderne, notamment dans les secteurs chimique, pétrochimique et énergétique, s'accompagne de l'utilisation de procédés mettant en jeu des réactions fortement exothermiques et des substances thermiquement instables. Bien que ces procédés soient essentiels à la production industrielle, ils présentent des risques majeurs lorsqu'ils ne sont pas correctement maîtrisés. Parmi les phénomènes les plus critiques figure l'emballement thermique, reconnu comme l'une des causes principales des accidents industriels liés aux réactions chimiques incontrôlées.

Selon plusieurs études scientifiques publiées dans la littérature spécialisée, notamment via la base de données Science Direct, près de 25 % des accidents dans l'industrie chimique seraient associés à des phénomènes d'emballement thermique. Cette proportion significative met en évidence la nécessité d'une compréhension approfondie de ce phénomène et de ses mécanismes fondamentaux.

L'emballement thermique est défini comme une augmentation rapide, auto-accélérée et incontrôlée de la température d'un système réactionnel. Il se produit lorsque la chaleur générée par une réaction exothermique dépasse la capacité du système à la dissiper vers l'environnement extérieur. Cette accumulation d'énergie thermique entraîne une augmentation de la vitesse réactionnelle, conformément à la loi d'Arrhenius, ce qui accentue davantage la production de chaleur et peut conduire à une perte totale de contrôle du procédé. Les conséquences potentielles incluent des explosions, des incendies, des rejets toxiques et la destruction d'installations industrielles.

L'étude de l'emballement thermique repose sur l'analyse des cinétiques chimiques, des bilans énergétiques et des critères de stabilité thermique développés notamment par Semenov et Frank-Kamenetskii. L'identification des paramètres critiques tels que la température critique, le temps d'induction, la pression et les conditions de confinement est essentielle pour évaluer la stabilité d'un système réactionnel. Par ailleurs, des outils méthodologiques de gestion des risques tels que l'analyse HAZOP, l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), l'Arbre de Défaillance (ADD) et les études de dangers réglementaires sont largement utilisés afin de prévenir ce type d'accident.

Les statistiques internationales confirment l'ampleur du risque. En Chine, 271 accidents liés à des phénomènes d'emballement thermique ont été recensés entre 1974 et 2019. En France, 169 accidents ont été enregistrés entre 1974 et 2014. Au Royaume-Uni, ces accidents ont causé 17

décès et plus de 300 blessés. Certaines analyses globales estiment que les accidents impliquant des réactions thermiques incontrôlées auraient causé environ 25 000 décès directs et plusieurs centaines de milliers de victimes indirectes en raison des effets secondaires et des impacts environnementaux.

L'histoire industrielle est marquée par plusieurs catastrophes majeures impliquant des réactions chimiques incontrôlées ou des défaillances dans la gestion thermique, telles que la catastrophe de Seveso (1976), la catastrophe de Bhopal (1984), l'explosion de l'usine AZF à Toulouse (2001) et plus récemment l'explosion du port de Beyrouth (2020). Ces événements ont mis en évidence les conséquences dramatiques d'une perte de maîtrise des procédés chimiques et souligne l'importance d'une approche rigoureuse en matière de sécurité des procédés.

Dans ce contexte, l'étude de l'emballement thermique constitue un enjeu majeur pour la sécurité industrielle. Ce mémoire vise à analyser les mécanismes physico-chimiques à l'origine de ce phénomène, à identifier les facteurs déclencheurs dans les installations industrielles et à proposer des mesures de prévention et de protection adaptées afin de réduire la probabilité et la gravité des accidents.

Le premier chapitre présente les généralités relatives à l'emballement thermique. Le deuxième est consacré aux principales méthodes d'analyse des risques. Le troisième traite de la modélisation par les réseaux bayésiens. Enfin, le quatrième chapitre est consacré à l'analyse de l'emballement thermique et à la présentation des résultats obtenus.

Chapitre 1 :

Généralités sur l’emballement thermique

Définition

Un emballement thermique est la situation dans laquelle un réacteur chimique est hors de contrôle en ce qui concerne la production de température et/ou de pression causée par la réaction chimique elle-même

L'emballement thermique d'un réacteur chimique est un phénomène auto-accéléré dans lequel l'augmentation de la température à l'intérieur du réacteur accélère la vitesse des réactions exothermiques. En libérant davantage de chaleur que le système de refroidissement ne peut en évacuer, la température et la pression augmentent rapidement. Si aucune action n'est entreprise, cela peut provoquer une surpression, une décomposition incontrôlée des produits, un incendie ou une explosion, transformant un incident local en accident industriel majeur.

Voie d'accès typique pour un réacteur chimique :

Initiation : Défaillance du système de refroidissement, erreur de dosage des réactifs, agitation insuffisante, contamination ou élévation anormale de la température initiale.

Décomposition / Accumulation de chaleur : La réaction exothermique s'intensifie ; la chaleur produite dépasse la capacité d'évacuation thermique ; la pression et les vapeurs augmentent.

Emballement thermique et conséquences : La température s'accélère brutalement ; la réaction devient incontrôlable ; le réacteur peut subir une surpression, une fuite toxique, un incendie ou une explosion. [1]

Qu'est-ce que le risque d'emballement thermique ?

L'emballement thermique, phénomène redouté par les différents acteurs de l'industrie chimique, correspond à la perte de contrôle de température d'un milieu réactionnel. Celle-ci peut conduire à une explosion thermique, caractérisée par la libération brutale d'une importante quantité d'énergie, souvent accompagnée de fortes émissions de gaz et/ou de vapeur pouvant être dramatique. L'éclatement du réacteur ainsi que la combustion explosive des gaz émis peut alors entraîner, par effet de souffle, la destruction des bâtiments et la formation d'incendies secondaires pouvant aggraver les conséquences globales par effet domino [2]

Scénarios pouvant conduire à un emballement thermique :

Température excessive (erreur de procédé, panne du refroidissement).

Temps de séjour excessif à la température du procédé (réaction auto catalytique).

La notion de distribution des temps de séjour a été initiée par Danckwerts en 1953 en proposant une approche systémique pour décrire le comportement hydrodynamique des écoulements dans les réacteurs réels.

L'approche systémique, par rapport à l'approche conventionnelle qui utilise l'écriture locale de bilans de matière, d'énergie et de quantité de mouvement, se démarque par le fait que l'on attribue, à chaque entité présente dans le réacteur, un caractère spécifique. Cette approche systémique est plus connue sous le terme de bilan de population.

Ainsi, pour la distribution des temps de séjour, on peut affecter à chaque molécule :

- α son âge, c'est-à-dire le temps qui s'est écoulé entre son entrée dans le réacteur et le moment de l'observation ;
- λ son espérance de vie, c'est-à-dire le temps qui lui reste à passer entre le moment d'observation et sa sortie du réacteur ;
- Et enfin, par la somme de ces deux notions, on aboutit au temps de séjour de la molécule dans le réacteur. [3]

Les types d'emballement thermique

Dans l'industrie chimique, plusieurs types d'emballement thermique peuvent être identifiés selon l'origine du phénomène :

Emballement thermique dû à une réaction chimique exothermique

Il s'agit du type d'emballement thermique le plus fréquent dans l'industrie chimique. Une réaction exothermique produit de la chaleur, ce qui entraîne une augmentation de la température du milieu réactionnel. Cette augmentation de température accélère la vitesse de la réaction, ce qui génère encore plus de chaleur et crée ainsi un phénomène de rétroaction positive.

Des exemples de réactions industrielles pouvant provoquées ce phénomène sont l'oxydation, l'hydrogénation et la polymérisation. Selon les études en génie chimique, l'emballement thermique apparaît lorsque la chaleur produite par la réaction dépasse la capacité du système à l'évacuer.

Emballement thermique par décomposition auto-accélérée

Certains produits chimiques deviennent instables lorsqu'ils atteignent une température critique et se décomposent rapidement en libérant une grande quantité de chaleur.

Des exemples typiques sont les peroxydes organiques, certains nitrates et certaines substances explosives. Ce phénomène est souvent caractérisé par la température de décomposition auto-accélérée (SADT). Lorsque la chaleur générée par la décomposition dépasse la capacité de dissipation thermique du système, la réaction devient incontrôlable.

Emballement thermique dû à une défaillance du système de refroidissement

Dans les réacteurs industriels, les réactions chimiques doivent être contrôlées par des systèmes de refroidissement afin d'évacuer la chaleur produite. Si ce système devient défaillant ou insuffisant, la température du réacteur augmente progressivement, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse de réaction et peut conduire à un emballement thermique.

Les causes les plus fréquentes sont :

Une panne du système de refroidissement ;

Une agitation insuffisante du milieu réactionnel ;

La formation de points chauds à l'intérieur du réacteur.

Emballement thermique d'origine électrique

Ce type d'emballement se produit dans les systèmes électriques ou électroniques lorsque l'augmentation de la température entraîne une augmentation du courant électrique, ce qui génère encore plus de chaleur.

Ce phénomène peut apparaître dans certains composants électroniques industriels tels que les transistors, les condensateurs ou d'autres circuits électroniques.

Emballement thermique dans les batteries industrielles

Dans les batteries lithium-ion utilisées dans l'industrie, les véhicules électriques ou les systèmes de stockage d'énergie, un emballement thermique peut survenir lorsqu'une cellule subit une surchauffe.

Dans ce cas :

La température de la cellule augmente ;

Des réactions chimiques internes libèrent de la chaleur et des gaz ;

La température s'élève rapidement.

Ce phénomène peut entraîner un incendie ou une explosion si la pression interne de la batterie devient trop élevée.

Emballement thermique par auto-échauffement (combustion spontanée)

Certains matériaux peuvent s'échauffer progressivement en raison de réactions chimiques internes, telles que l'oxydation ou la fermentation. Lorsque la chaleur produite s'accumule et n'est pas suffisamment dissipée, la température peut atteindre le point d'auto-inflammation.

Des exemples courants incluent le charbon, le coton, certaines huiles et les déchets organiques. Ce phénomène peut conduire à une combustion spontanée après une accumulation progressive de chaleur. [4]

Réacteur chimique

Définition

Un réacteur est un équipement utilisé dans l'industrie chimique pour réaliser des réactions chimiques entre différents produits. Son rôle est de fournir un environnement sûr et contrôlé pour permettre le déroulement des réactions chimiques à l'intérieur de la cuve.

Le réacteur est conçu pour résister aux conditions chimiques parfois agressives générées par les réactions. L'acier inoxydable (inox) est souvent utilisé comme matériau de fabrication, car il présente une excellente résistance à la corrosion et ne réagit pas avec la plupart des produits chimiques utilisés dans la cuve. Cela en fait un matériau particulièrement adapté pour la construction des réacteurs chimiques.

Selon Labbe Process Equipment, les réacteurs chimiques sont largement utilisés dans l'industrie pour la synthèse de nombreux produits, notamment les colles, les résines d'imprégnation, les peintures ainsi que divers produits chimiques spécialisés.

Types de réacteurs chimiques

Il existe plusieurs types de réacteurs chimiques utilisés dans l'industrie :

Réacteur chimique discontinu (batch reactor)

Réacteur chimique à cuve agitée en continu (Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR))

Réacteur à flux piston (Plug Flow Reactor – PFR)

Réacteur chimique semi-discontinu (semi-batch reactor)

Réacteur chimique catalytique

Chaque type de réacteur est choisi en fonction de la nature de la réaction chimique, des conditions opératoires et du type de production industrielle. [5]

Les phases de l'emballement thermique dans un réacteur chimique

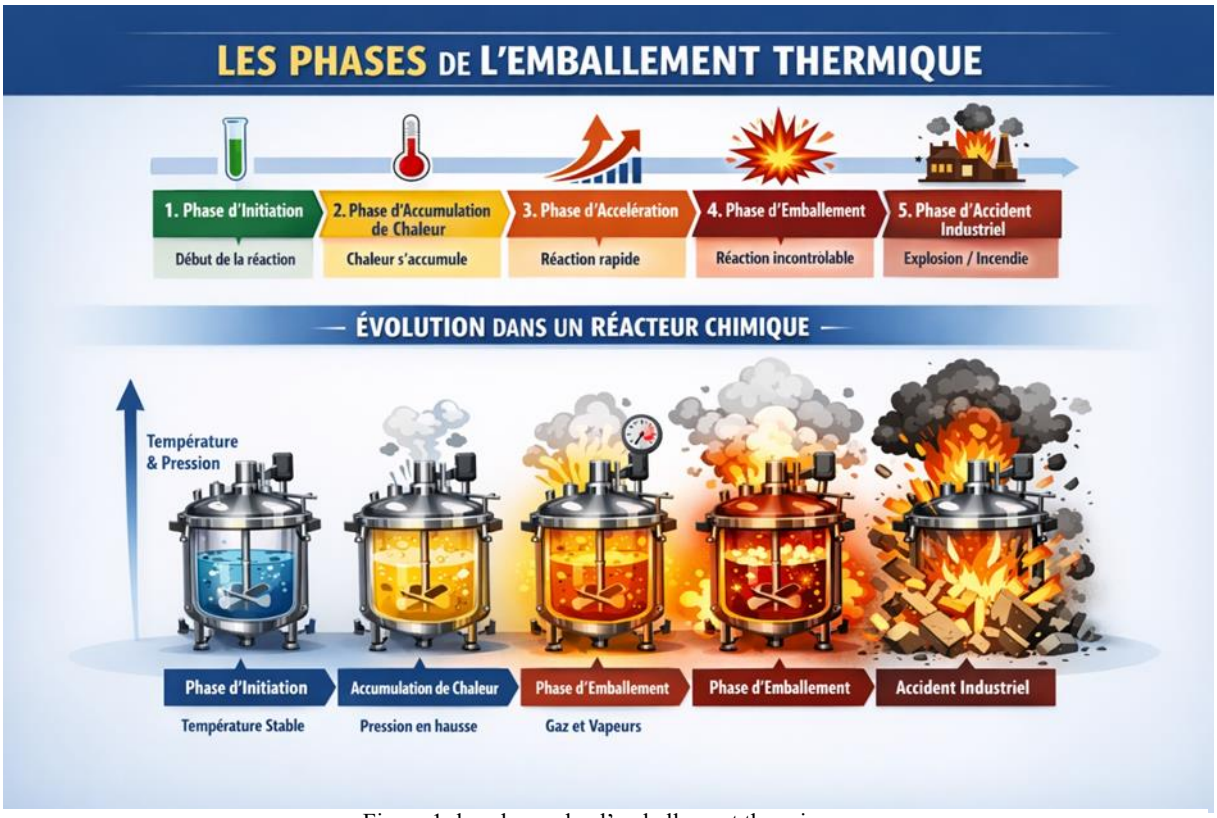


Figure 1: les phases den l'emballement thermique

Les principaux risques liés à l'emballement thermique

Risques thermiques

L'emballement thermique provoque une augmentation très rapide de la température dans le réacteur.

Conséquences

Surchauffe du réacteur

Dégradation des matériaux

Fusion de certaines pièces métalliques

Perte de contrôle de la réaction chimique

La température peut atteindre plusieurs centaines de degrés en quelques minutes, dépassant souvent les limites de conception de l'équipement.

Risques de surpression

L'augmentation rapide de la température entraîne généralement une augmentation de la pression dans le réacteur.

Causes

Formation de gaz lors de la réaction

Vaporisation rapide des liquides

Décomposition thermique de certains produits

Conséquences

Rupture du réacteur

Explosion mécanique

Ouverture des soupapes de sécurité

Projection de fragments métalliques

Risques d'explosion

L'emballement thermique peut provoquer plusieurs types d'explosions :

Explosion chimique : causée par une réaction chimique très rapide libérant une grande quantité d'énergie.

Explosion de pression : due à une augmentation excessive de la pression dans le réacteur.

Explosion de vapeur : provoquée par la vaporisation brutale d'un liquide à haute température.

Ces explosions peuvent entraîner la destruction d'installations industrielles.

Risques d'incendie

La chaleur élevée et la présence de substances inflammables peuvent provoquer des incendies industriels.

Causes

Présence de solvants inflammables

Fuite de gaz combustibles

Température très élevée

Conséquences

Propagation du feu dans l'installation industrielle

Dommages importants aux équipements

Interruption de la production

Risques toxiques

Lors d'un emballement thermique, certaines réactions chimiques peuvent produire des gaz toxiques ou dangereux.

Exemples

Vapeurs chimiques nocives, gaz irritants, Substances toxiques rejetées dans l'air

Un exemple historique est l'accident industriel de Seveso désastre, au cours duquel une réaction chimique incontrôlée a entraîné la libération de dioxine toxique dans l'environnement.

Risques environnementaux

Les accidents liés à l'emballement thermique peuvent provoquer :

Pollution de l'air

Contamination du sol

Pollution des eaux

Destruction de la faune et de la flore

Les effets environnementaux peuvent persister pendant plusieurs années.

Risques pour les travailleurs

Les travailleurs présents dans l'installation industrielle peuvent être exposés à :

Brûlures thermiques

Intoxications chimiques

Blessures causées par une explosion

Inhalation de gaz toxiques

Dans les cas les plus graves, ces accidents peuvent entraîner des pertes humaines.

Risques économiques

Les conséquences économiques peuvent être très importantes :

Destruction des installations industrielles

Arrêt prolongé de la production

Pertes financières importantes

Coûts élevés de réparation et de dépollution

Perte de réputation de l'entreprise

Des catastrophes causées par l'emballement thermique

Bhopal

Bhopal est une ville située en Inde, dans l'État du Madhya Pradesh, qui a été le théâtre en 1984, de la plus grande catastrophe industrielle de l'Histoire dans la nuit du 2 au 3 décembre 1984, causant la mort de milliers de personnes et des conséquences environnementales durables.

Quel produit chimique s'est échappé lors de la catastrophe de Bhopal ?

La substance chimique responsable de la catastrophe de Bhopal était l'isocyanate de méthyle (MIC), utilisé dans la fabrication de pesticides. Lors de l'explosion, environ de 40 tonnes de MIC se sont échappées dans l'air, provoquant une contamination massive. Ce gaz toxique s'est échappé d'une usine de production de pesticides appartenant au groupe multinational américain Union Carbide. Il a provoqué la mort de 16 000 à 30 000 personnes et 500 000 autres ont été blessées.

Pourquoi l'usine de Bhopal a-t-elle explosé ?

Avant l'explosion à Bhopal, l'usine de Bhopal était connue pour ses défaillances en matière de sécurité, principalement en matière de condition de stockage des produits chimiques. Elle avait déjà un impact néfaste sur l'environnement, car des déchets toxiques étaient enfouis dans les sols.

L'usine de Bhopal présentait :

Des défauts de conceptions : les systèmes de sécurité étaient défaillants et l'usine possédait un stockage excessif de MIC, dépassant les limites sécuritaires.

Une négligence et des réductions budgétaires : de nombreuses mesures avaient été prises afin de réduire les coûts, entraînant la suppression de certains dispositifs de sécurité.

Des problèmes de sécurité induisant l'intrusion d'eau dans un réservoir : la cause de la catastrophe ayant l'intrusion d'eau dans un réservoir contenu du MIC (substance chimique).

Cette catastrophe chimique sans précédent a conduit les industries chimiques à renforcer la sécurité de leurs sites pour ne pas être responsables de tels accidents. En France, un décret a été

adopté, il oblige les industriels à déclarer les substances chimiques à risque présentes sur leurs sites. « novethic » [7]



Figure 2 : accident de Bhopal (inde) 1984

Explosion de l'usine AZF de Toulouse

L'explosion importante de l'usine AZF de Toulouse est un accident industriel survenu le 21 septembre 2001 à Toulouse. Dans l'usine de production d'engrais azotés située en zone urbanisée, un stock de 300 à 400 tonnes de nitrate d'ammonium explose à 10 h 17, entraînant la mort de 31 personnes, faisant 2 500 blessés et de lourds dégâts matériels.

L'accident compte parmi les plus graves explosions accidentelles impliquant du nitrate d'ammonium. Il occasionne des dommages considérables au bâti du sud-ouest de l'agglomération toulousaine, puis une rénovation et la création de nombreux équipements publics dont l'Oncopole de Toulouse mis en service à partir de 2009. La garantie des catastrophes technologiques est par ailleurs créée par une loi de 2003 à la suite de cet accident.[8]

Catastrophe de Seveso

La catastrophe de Seveso est une catastrophe industrielle aux conséquences écologiques et sanitaires majeures, qui s'est produite le 10 juillet 1976, à Seveso, en Lombardie, dans le Nord de l'Italie.

Un nuage d'herbicide contenant des produits toxiques s'échappe de l'usine Icmesa (it) et contamine les alentours, provoquant à la fois des hospitalisations pour les enfants des

communes voisines et la mort de plusieurs dizaines de milliers d'animaux Cette catastrophe est extrêmement médiatisée.

Si aucune victime humaine directe n'est finalement à déplorer, les conséquences environnementales nécessitent la décontamination totale du site et de ses alentours. La disparition temporaire et fortuite des fûts contenant les déchets lors de leur voyage vers leur lieu de destruction suscite de forts soupçons de forfaiture de la part des industriels.

La catastrophe est notamment due à l'absence de tout plan d'urgence préparé par la société responsable de l'usine. C'est à la suite de cet évènement que les pouvoirs publics européens créeront la directive Seveso en 1982, afin de prévenir tout risque d'accident majeur sur un site industriel présentant un risque connu.[9]



Figure 3 : accident de Seveso [27]

Catastrophe de Flixborough

La catastrophe de Flixborough est une explosion d'une usine chimique ayant eu lieu à Flixborough en Angleterre le 1er juin 1974. Sur les 72 personnes qui étaient sur le site, elle en a tué 28 et blessé gravement 36. Cette catastrophe est notamment connue parce qu'elle a été provoquée par un changement d'équipement précipité, ce qui a eu un impact sur les bonnes pratiques industrielles.[10]

Retours d'expérience

Les différents accidents présentés ainsi que ceux de l'échantillon étudié montrent que la gestion et l'identification des risques sont souvent en cause. Lors de la mise au point d'un procédé, la question de la stabilité et/ou la toxicité des réactifs doit toujours être abordée ainsi que la réactivité des substances entre elles. Ceci implique de connaître parfaitement les caractéristiques de la réaction chimique (température, pression, cinétique, etc.) avant la conception de l'unité et si c'est le cas, les autres réactions susceptibles de se produire notamment en cas de dérive du procédé. Les conditions optimales de la réaction doivent être déterminées par une étude réalisée au préalable en ne perdant pas de vue les questions suivantes

Que se passe-t-il si l'on s'écarte de ces conditions, quelle est la marge dont on dispose concernant la température, la pression du réacteur ;

Quels volumes (réacteur/réactifs) et quels moyens de refroidissement doit-on prévoir dans le cas d'une réaction exothermique pour garder la maîtrise du procédé ;

Quels organes de sécurité doit-on prévoir et où doit-on les placer pour garantir leur efficacité en cas de perte de maîtrise du procédé ;

Quels organes de contrôle doit-on prévoir (sondes de température, pression - capteurs adaptés à la cinétique de réaction et/ou à celle d'une dérive éventuelle du procédé) et quels asservissements pour vérifier et assurer le bon déroulement du procédé ;

A-t-on pensé à la gestion des indisponibilités des capteurs et organes de sécurité (doublons, modes communs…)

Quels matériaux utiliser pour le réacteur et équipements connexes (par exemple, éviter les équipements en verre en cas de réactions accompagnées d'un dégagement gazeux, éviter les incompatibilités contenant contenu…)

Pour les procédés batch, dans quel ordre les réactifs doivent-ils être introduits, à quelle vitesse

Les risques spécifiques liés aux opérations de transfert (introduction des réactifs, de solutions de lavage dans le réacteur à partir d'un réservoir, vidange, etc…) ont-ils fait l'objet d'une analyse ;

Y-a-t-il des substances chimiques voisines, susceptibles d'entrer en contact avec celles impliquées dans le procédé et d'interagir…

Pour mener à bien une analyse de risque pertinente, des méthodes existantes telles que la méthode LOPA (Layer Of Protection Analysis) permettent d'évaluer la réduction du risque en analysant la contribution des différentes couches qui englobent l'ensemble des barrières, depuis la conception du procédé jusqu'aux mesures de secours en cas d'accident. La mise en place d'un Système Instrumenté de Sécurité (SIS) permet d'éviter qu'une situation de fonctionnement dégradé dégénère jusqu'à l'accident (mise en place de capteurs mesurant les paramètres de réaction, analyse d'un éventuel écart par rapport aux conditions définies et si nécessaire mise en sécurité du procédé).

Une fois le procédé établi, le personnel doit être formé et averti des risques en cas d'écart par rapport aux conditions définies par le cahier des charges. La formation du personnel et l'établissement de consignes et procédures sont indispensables pour éviter les dérives et les initiatives malheureuses des opérateurs. Toute modification même jugée mineure doit être effectuée après une évaluation complète des conséquences possibles sur le procédé et la décision finale doit faire l'objet d'une concertation. La signalisation tant au niveau du procédé (vannes, canalisations, cuves, etc..) qu'au niveau des moyens de secours (extincteurs, RIA), issues de secours, ne doit pas être négligée. Chaque fois que cela est possible, l'automatisation du procédé doit être mise en œuvre pour réduire l'intervention du personnel et donc limiter l'erreur humaine à condition que les organes de sécurité et de contrôle garantissent le bon fonctionnement du procédé. En cas d'opérations particulièrement à risque, un double contrôle par deux opérateurs est recommandé. Enfin, plusieurs accidents sont liés à la perte d'utilité de l'unité. Il est donc important de prévoir une alimentation de secours sur les équipements critiques liés à des réactions exothermiques. [24]

Causes de l'emballement thermique

Causes techniques

Défaillance du système de refroidissement

Panne de la pompe de circulation

Mauvais transfert de chaleur dans le réacteur

Agitation insuffisante du mélange réactionnel

Défaillance des capteurs de température ou de pression

Défaillance du système de contrôle automatique

Perte d'alimentation électrique

Mauvais dimensionnement du réacteur

Accumulation de chaleur dans le système

Causes humaines

Erreur de dosage des réactifs

Introduction trop rapide des réactifs

Mauvaise surveillance du procédé

Erreur de manipulation de l'opérateur

Non-respect des procédures de sécurité

Mauvaise formation du personnel

Causes chimiques

Réaction fortement exothermique

Réactions secondaires imprévues

Présence d'impuretés catalytiques

Décomposition thermique de certains produits

Accumulation de réactifs instables

Incompatibilité entre produits chimiques

Causes opérationnelles

Température initiale trop élevée

Pression de fonctionnement trop élevée

Mauvais contrôle de la vitesse de réaction

Mauvaise régulation du système de refroidissement

Conséquences de l'emballement thermique

Conséquences techniques

Augmentation rapide de la température

Augmentation de la pression dans le réacteur

Déformation ou rupture du réacteur

Explosion industrielle

Incendie

Projection de fragments métalliques

Dégradation des équipements

Conséquences humaines

Brûlures thermiques

Intoxication par gaz toxiques

Blessures dues à l'explosion

Décès dans les cas graves

Conséquences environnementales

Émission de gaz toxiques

Pollution de l'air

Contamination du sol

Contamination des eaux

Destruction de la faune et de la flore

Conséquences économiques

Destruction des installations industrielles

Arrêt de la production

Pertes financières importantes

Coûts élevés de réparation et de dépollution

Perte de réputation de l'entreprise

Appareils de mesure des paramètres thermique et cinétique

Le calorimètre différentiel à 1balayage DSC fournit la stabilité

Thermique des échantillons sur un gamme de températures (de 0 à500°C). Cette analyse thermique requiert de faibles quantités de produits (quelques milligrammes).

Le calorimètre isotherme de type Calvet C80 mesure la chaleur de réaction et détermine la cinétique des réactions chimiques. Les quantités mises en oeuvre sont de l'ordre digramme.

Le calorimètre réactionnel RC1 détermine des paramètres thermiques et cinétiques à l'échelle d'un réacteur de laboratoire dans des conditions proches des conditions industrielles (échelle du litre). Cette technique macro-calorimétrique met en œuvre des échantillons de l'ordre du kilogramme et permet de réaliser des réactions chimiques en mesurant le flux de chaleur échangé au travers de la paroi du réacteur.[11]

Appareils de mesure des phases d'emballement thermique

Le Phi-Tec I (ou "Adiabatique Réaction Calorimètre") est utilisé pour déterminer la vitesse de montée en température et la pression développée au cours d'un emballement thermique dans une bombe à haute pression d'un volume de 10 ml. Cet appareil est utilisé comme essai préliminaire pour caractériser l'emballement des systèmes chimiques exothermiques. Deux appareils sont plus spécifiquement dédiés à l'étude des phases d'emballement pour le dimensionnement des disques de ruptures :

Le calorimètre ARSST détermine, en cas d'emballement thermique, la cinétique de la réaction ainsi que la cinétique de production de gaz incondensables. Cette méthode permet de déterminer les paramètres thermiques et de caractériser la violence des réactions. Elle met en œuvre des échantillons d'environ 10 ml.

Le calorimètre VSP II simule comme le ARSST des phases d'emballement. Il permet de travailler en cellule ouverte ou en cellule fermée sur des mélanges de l'ordre de 100 ml. Cet appareil confère de très bonnes conditions adiabatiques grâce à une régulation performante de la pression et de la température au cours du temps. Notre laboratoire regroupe six appareils, complémentaires par la taille et par la nature des données obtenues.[12]

Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales relatives à l'emballement thermique, en mettant en évidence ses mécanismes, ses différentes formes ainsi que les facteurs susceptibles de le déclencher. L'étude a montré que ce phénomène constitue un danger majeur dans les installations industrielles, notamment dans les réacteurs chimiques où une perte de contrôle de la température peut entraîner des conséquences graves telles que les incendies, les

explosions et les rejets toxiques. L'analyse des principaux accidents industriels a également souligné l'importance de la maîtrise des paramètres opératoires et de la mise en place de mesures de prévention adaptées. Ainsi, la compréhension approfondie de ce phénomène représente une étape essentielle pour assurer la sécurité des procédés industriels.

Chapitre 2 :
Les méthodes d’analyse

1. Introduction :

La gestion des risques est une des composantes fondamentales de la réussite d'une entreprise, que ce soit en terme économique ou environnemental. Gérer un risque est un processus itératif fondé sur 1'analyse des risques, étape qui permet d'identifier et de réaliser une première évaluation des risques.

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques notions relatives à la gestion des risques et aux méthodes d'analyse

Définition :

La gestion des risques est une opération commune à tout type d'activité. Les objectifs

Pour suivis peuvent concerner par exemple

Le gain de rentabilité, de productivité,

La gestion des coûts et des délais,

La qualité d'un produit...

Principes pour la gestion des risques :

La gestion du risque peut être définie comme l'ensemble des activités coordonnées en vue de réduire le risque à un niveau jugé tolérable ou acceptable.

De manière classique, la gestion du risque est un processus itératif qui inclut notamment les phases suivantes

Appréciation du risque (analyse et évaluation du risque),

Acceptation du risque,

Maîtrise ou réduction du risque.

L'enchaînement de ces différentes phases est décrit de manière schématique dans la Figure ci-dessous.

L'analyse des risques :

Définition :

La définition retenue par le Guide de la norme ISO/CEI 73 est

« ...utilisation systématique d'informations pour identifier les phénomènes dangereux et pour estimer le risque en découlant... ».

Analyser les risques d'une installation consiste essentiellement à identifier les dysfonctionnements de natures technique et opératoire (opérationnelle, relationnelle, organisationnelle) dont 1'enchaînement peut conduire à des événements non souhaités par rapport aux cibles (individus, populations, écosystèmes, systèmes matériels ou symboliques).

Approche de l'analyse des risques :

L'importance de la sûreté de fonctionnement d'un système exige une analyse de

Risque pour les systèmes et leurs équipements. La forme de cette analyse peut changer considérablement, selon des circonstances, s'étendant des approches qualitatives descriptives aux approches quantitatives numériques. Cependant, dans toutes les approches, l'analyse de risque devrait contenir les étapes suivantes :

Identification des mécanismes potentiels de détérioration et modes d'échec,

Évaluation de la probabilité de l'échec de chaque mécanisme,

Identification des scénarios d'accidents comportant l'échec de l'équipement,

Évaluation des conséquences résultant de l'échec d'équipement,

Détermination des risques de l'échec d'équipement,

Rang et catégorisation de risque.

Synthèse et conclusions :

La synthèse de l'analyse qualitative et quantitative mettra en évidence les défaillances compromettant le fonctionnement du système ainsi que les composants les plus critiques ou les missions les plus importantes du système

Les conclusions permettent de proposer des solutions au vue de l'analyse précédente telles que

Une amélioration de la fiabilité des composants,

Une adjonction de protection ou de dispositif de surveillance ou de contrôle,

Une protection supplémentaire contre des défauts de causes communes,

Une modification des caractéristiques des tests périodiques ou de la maintenance,

Une maintenance préventive sur certains composants, des essais périodiques supplémentaires de certains composants.

Critères de choix des méthodes :

Les critères suivants interviennent dans le choix d'une méthode d'analyse :

Critères liés aux objectifs de l'analyse,

Critères liés au système étudié,

Critères liés aux moyens d'étude [13]

Méthode HAZOP :

La méthode HAZOP est un outil formalisé, systémique et semi-empirique utilisé et développé depuis quarante ans pour analyser les risques potentiels associés à l'exploitation d'une installation industrielle. Inventée en 1965 en Grande-Bretagne par la société ICI (Imperial chemical industries), elle était conçue comme une technique et s'adressait particulièrement à la phase d'ingénierie de détail de nouvelles installations chimiques ou pétrochimiques. Elle innovait par rapport aux pratiques des codes de construction et des revues sécurité sur schémas employées à l'époque par les sociétés d'ingénierie, toutes basées sur l'analyse d'évènements passés. Son originalité résidait dans son approche a priori des dangers et des dysfonctionnements d'une installation par l'étude systématique des déviations des paramètres gouvernant le procédé à analyser. Cette technique s'est développée hors des limites de la société ICI, au sein de l'industrie chimique et pétrochimique après l'explosion catastrophique, en 1974, d'un nuage de 40 tonnes de cyclohexane à Flixborough en Grande-Bretagne qui fit 28 morts et 89 blessés. De simple technique, la méthode HAZOP est devenue une pratique d'identification des dangers et des problèmes d'exploitabilité, adoptée par de nombreuses industries « à risques », en particulier, l'industrie pétrolière caractérisée par des dangers similaires à ceux de l'industrie chimique ou pétrochimique, mais aussi dans des industries où les dangers sont d'une autre nature, comme ceux rencontrés dans le nucléaire, l'alimentaire et les transports. La méthode HAZOP est abordée en trois parties :

Ce premier article [SE 4 030] est consacré aux définitions, objectifs et domaines d'application

Le deuxième, [SE 4 031] en présente le principe ;

Le troisième, [SE 4 032] est consacré à la mise en œuvre et à l'illustration de cette méthode. Les références bibliographiques sont regroupées dans la fiche documentaire [Doc. SE 4 033].

Objectifs

L'objectif de la méthode HAZOP est, à l'origine, d'identifier les dysfonctionnements de nature technique et opératoire dont l'enchaînement peut conduire à des événements non souhaités. Il s'agit

donc de déterminer, pour chaque sous-ensemble ou élément d'un système bien défini, les conséquences d'un fonctionnement hors du domaine d'utilisation pour lequel ce système a été conçu [14]

Tableau 1 : méthode HAZOP

Paramètre	Déviation	Drivée	Cause	Conséquence	Détection	Recommandation
Température	Plus de	Augmentation de la température	Panne de système de refroidissement	Emballement thermique	Alarme à haute température	1 Vérifier l'état des vannes et des conduites de refroidissement 2 installer une double alimentation électrique pour le circuit de refroidissement

APR

L'analyse Préliminaires des Risques (Dangers) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautiques et militaires. Utilisée depuis dans de nombreuses autres industries. L'analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode d'usage très général couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. En conséquence, cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de l'installation étudiée. En ce sens, elle est particulièrement utile dans les situations suivantes :

• Au stade de la conception d'une installation, lorsque la définition précise du procédé n'a pas encore été effectuée. Elle fournit une première analyse de sécurité se traduisant par des éléments constituant une ébauche des futures consignes d'exploitation et de sécurité. Elle permet également de choisir les équipements les mieux adaptés.

• Dans le cas d'une installation complexe existante, au niveau d'une démarche d'analyse des risques. Comme l'indique son nom, l'APR constitue une étape préliminaire, permettant de mettre en lumière des éléments ou des situations nécessitant une attention plus particulière et en conséquence l'emploi de méthodes d'analyses de risques plus détaillées. Elle peut ainsi être complétée par une méthode de type AMDEC ou arbre des défaillances par exemple. Dans le cas d'une installation dont le niveau de complexité ne nécessite pas d'analyses plus poussées au regard des objectifs fixés au départ de l'analyse des risques

Principe

L'analyse Préliminaire des Risques nécessite dans un premier temps d'identifier les éléments dangereux de l'installation. Ces éléments dangereux désignent le plus souvent :

• Des substances ou préparations dangereuses, que ce soit sous forme de matières premières, de produits finis, d'utilités...,

• Des équipements dangereux comme par exemple des stockages, zones de réception expédition, réacteurs, fournitures d'utilités (chaudière...),

• Des opérations dangereuses associées au procédé

Limites et avantages

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations. Par rapport aux autres méthodes présentées ci-après, elle apparaît comme relativement économique en terme de temps passé et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé. Cet avantage est bien entendu à relier au fait qu'elle est généralement mise en œuvre au stade de la conception des installations. En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des évènements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes. Comme son nom l'indique, il s'agit à la base d'une méthode préliminaire d'analyse qui permet d'identifier des points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées. Elle permet ainsi de mettre en lumière les équipements ou installations qui peuvent nécessiter une étude plus fine menée grâce à des outils comme l'AMDEC, l'HAZOP ou l'analyse par arbre des défaillances. Toutefois, son utilisation seule peut être jugée suffisante dans le cas d'installations simples ou lorsque le groupe de travail possède une expérience significative de ce type d'approches.[15]

ADD

Un arbre de défaillance ADD ou Fault tree analysis FTA (en anglais) est une technique déductive (de conséquence vers ses causes) utilisée dans l'ingénierie des études de sécurité et de fiabilité des systèmes dans l'industrie, pour l'évaluation de la conception et enfin l'amélioration des systèmes. La méthode consiste à réaliser les combinaisons possibles des fautes ou pannes (défaillance des équipements, matérielles ou des logiciels, des défaillances de processus, erreurs humaines…) d'un système qui permettent l'occurrence d'un évènement indésirable prédéfini, et les représenter logiquement d'une manière graphique par une arborescence (schéma graphique en forme d'arbre

inversé). Cette méthode est complétée par un traitement mathématique qui permet de quantifier la probabilité d'apparition des défaillances et de l'évènement indésirable. [25]

Principe :

L'ADD est utilisé pour l'amélioration des systèmes, il permet de : - Identifier les scénarios des défaillances élémentaires et trouvez les composants les plus probables de conduire la défaillance d'un système, ou à des accidents. - Représente l'enchaînement logique des évènements des composants défaillants jusqu'à la panne de système pour une meilleure logistique. - La possibilité de quantifier l'arbre et obtenir des chiffres qui représentent la fiabilité, taux de défaillance… - Un outil d'analyse des systèmes qui permet de faire un diagnostic rapide lors qui il est établi. - Une méthode préventive pour éviter les défaillances ou des changements de conception qui peut réduire le coût. 18 3. La construction de l'ADD : L'ADD consiste en des évènements connectés par des portes logiques. Les évènements et les portes ont des symboles graphiques déférents, les évènements contiennent le mode de défaillance. Figure 5 : Schéma représentatif de la construction de l'ADD

Avantage et limite :

Avantage :

L'analyse par l'arbre de défaillance présente un certain nombre d'avantages par rapport aux autres méthodes : - la forme graphique constitue un moyen efficace de représentation logique qui facilite la compréhension des systèmes. - la méthode déductive permet de focaliser uniquement sur les événements contribuant à l'apparition des défaillances. - l'orientation des événements. - la considération des défaillances n'inclut pas seulement sur les composants, mais aussi les logicielles, des erreurs humaines, même la nature d'environnement. - les deux types d'exploitation qualitative et quantitative de l'arbre qui permet de hiérarchiser les composants et déterminer les points faibles vulnérables du système. - permet de réaliser des calculs rapides et exacts des variétés des probabilités.

Limite :

L'utilisation de l'arbre de défaillance est difficile lors des certains cas : - l'indépendance des événements effectuer les calculs des probabilités. - l'apparition des événements temporelle. - l'anticipation des événements, tous les événements sont prévus pas atteint. - la dégradation de l'état des composants, l'arbre considère l'état de fonctionnement et l'état de défaillance pas l'état intermédiaire. - la taille de l'arbre des grands systèmes réduit la lisibilité et la compréhension, requis la division en sous-arbres et les transféré. - le temps de construction, est coûteux lorsque les systèmes critiques sont définis avec prudence.[16]

AMDEC

Le signe AMDEC signifie « Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité », en anglais FMEA « Failure Mode and Effects Analysis ».

Cette méthode d'analyse des risques, et notamment des risques liés à une défaillance dans le système, garantit une reconnaissance de fiabilité pour les entreprises. Elle représente un gage de qualité, de satisfaction du consommateur et donc de compétitivité.

La méthode AMDEC est particulièrement adaptée aux usines de production afin d'anticiper tout défaut sur la chaîne de production et de mettre en place des actions correctives rapidement.

Au-delà de l'analyse des risques, c'est également un outil de gestion de la qualité, permettant une analyse préventive afin de repérer et de mesurer l'éventualité qu'un défaut ou une défaillance se présente et de traiter la cause avant qu'ils ne se produisent.

Il s'agit d'analyser : la gravité (G) des effets ((aussi appelée sévérité du défaut/défaillance) ; l'occurrence (O) des défaillances (aussi appelée probabilité d'apparition de la cause) ; ainsi que la détectabilité (D) de cette défaillance (la probabilité de non détection de la cause).

L'indice de criticité (C) résultant est le produit des trois indicateurs précédents.

Criticité = Gravité x Occurrence x Détectabilité [17]

Tableau 2 méthode AMDEC

Equipment	Fonction	M d d	Causes	Effets	G	P	D	C	Mesures corrective
Réacteur chimique	Assurer la réaction chimique	Surchauffe	Réaction Exothermique	Explosion	10	3	3	90	Automatiser dosage

G : gravite

P : probabilité

D : détection

C= criticité

Conclusion :

Dans ce chapitre, plusieurs méthodes d'analyse des risques ont été étudiées, notamment l'HAZOP, l'APR, l'AMDEC et l'Arbre de Défaillance (ADD). Chaque méthode présente des caractéristiques spécifiques permettant d'identifier, d'évaluer et de maîtriser les risques industriels. Cette étude comparative a montré que le choix de la méthode dépend de la nature du système étudié, du niveau de détail recherché et des objectifs de l'analyse. Parmi les méthodes présentées, l'ADD s'est révélé particulièrement adapté à l'identification des causes conduisant à un événement redouté tel que l'emballement thermique. Les résultats obtenus constituent une base solide pour la modélisation probabiliste développée dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 :

Modélisation par réseau bayésien

1. Introduction :

Les réseaux bayésiens sont une application directe de la théorie bayésienne. L'utilisation essentiel des réseaux bayésiens est de calculer les probabilités conditionnelles d'événements reliés les uns aux autres par des relations de cause à effet. Dans ce chapitre une réalisation du modèle bayésien sera réalisée, sur AgenaRisk à partir des statistiques d'accidents de travail survenues au cours des cinq dernières années au niveau de la cimenterie Lafarge Oggaz.

Définition de réseau bayésien :

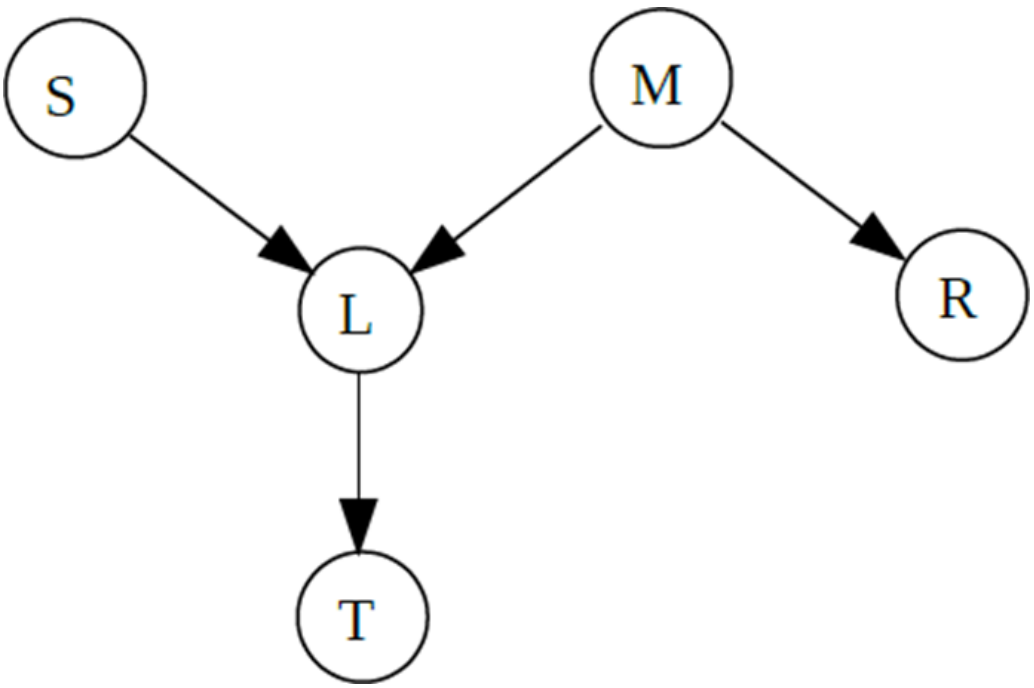
Un réseau bayésien est un graphe causal auquel on a associé une représentation probabiliste sous-jacente. Cette représentation permet de rendre quantitatifs les raisonnements sur les 1causalités que l'on peut faire à l'intérieur du graphe. [18]

Un réseau bayésien est un graphe oriente acyclique avec un ensemble N de nœuds et un ensemble A d'arcs orientes. Un nœud contient

• le nom d'une variable

• une table de probabilités de cette variable en fonction des valeurs parents [24] Les nœuds sont les variables aléatoires et les arcs sont les relations (si possibles) causales entre ces variables

L'absence d'arc signifie une indépendance conditionnelle



Présentation d'AgenaRisk :

AgenaRisk © (site) est un outil visuel, facile à utiliser, intuitif et puissant pour modeler le risque et pour faire des prédictions au sujet d'événements incertains.

Objectif d'utilisation :

Agena Risk nous permet de réaliser le réseau bayésien, de calculer facilement les probabilités à partir données, des statistiques ou des expériences vécus. Il aide à modéliser les risques, à analyser l'incertitude et à prendre de meilleures décisions, combine les avantages des réseaux bayésiens, et permet une simulation statistique et l'analyse de tableau.

Domaine d'utilisation :

Secteur de l'industrie :

Agena Risk a été utilisé par certaines des principales organisations mondiales pour modéliser les risques et améliorer la prise de décision dans une gamme de secteurs industriels, notamment : L'aérospatiale, les banques, la défense, l'énergie et l'environnement, la santé, la technologie, les télécommunications, le transport. - 45 –

Réalisation du modèle bayésien

Problèmes critiques d'entreprise et de sécurité :

Agenarisk a été utilisé aussi par quelques principales organisations mondiales pour obtenir des solutions imminentes à une gamme de problèmes stratégiques d'affaires et de sécurité, notamment : La gestion des projets complexes, le risque opérationnel et la continuité des activités, la prédiction de la durabilité et de la maintenance des systèmes critiques, l'acquisition des actifs militaires critiques, la gestion des projets, la planification stratégique et la prise de décision en matière d'investissement.

Le mode d'utilisation d'AgenaRisk : AgenaRisk est une variation nouvelle de la méthode bayésienne. C'est un logiciel intuitif où la réalisation du réseau ne nécessite pas une connaissance approfondie de la théorie Bayésienne. Les utilisateurs d'AgenaRisk devront juste être capables de construire le réseau bayésien selon les normes du logiciel. Le réseau bayésien est composé des nœuds qui représentent les paramètres des statistiques ou des expériences, et des liaisons qui représentent la relation entre ces paramètres.

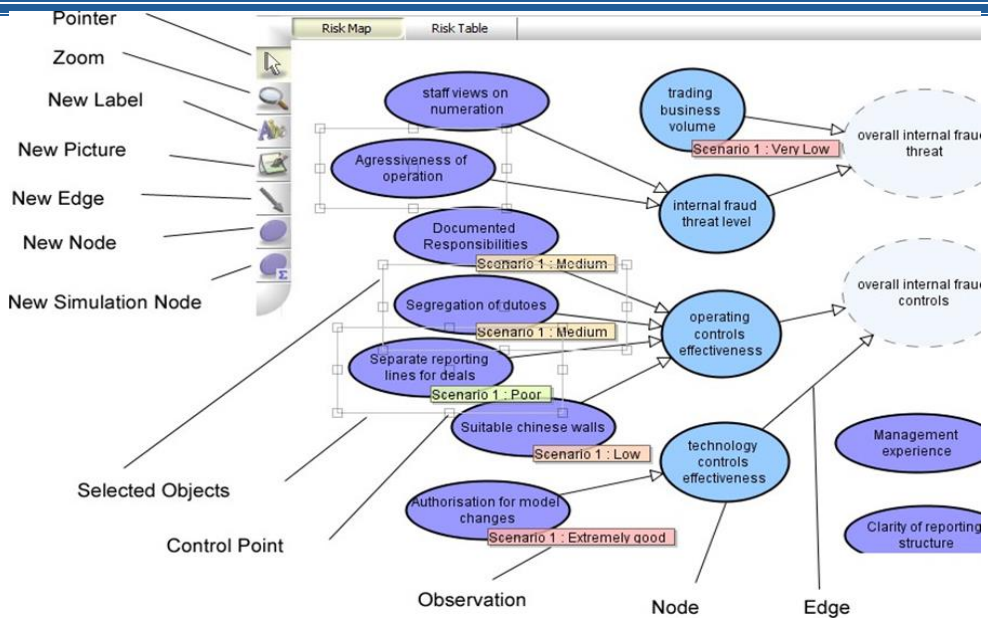


Figure 4 : exemple d'un réseau bayésien présenté sur AgenaRisk

Propriétés des nœuds

Les nœuds doivent être identifié par :

Le nom de paramètre étudié

Le titre unique d'identification

Le type de nœud

Les composants du nœud

La table de probabilités

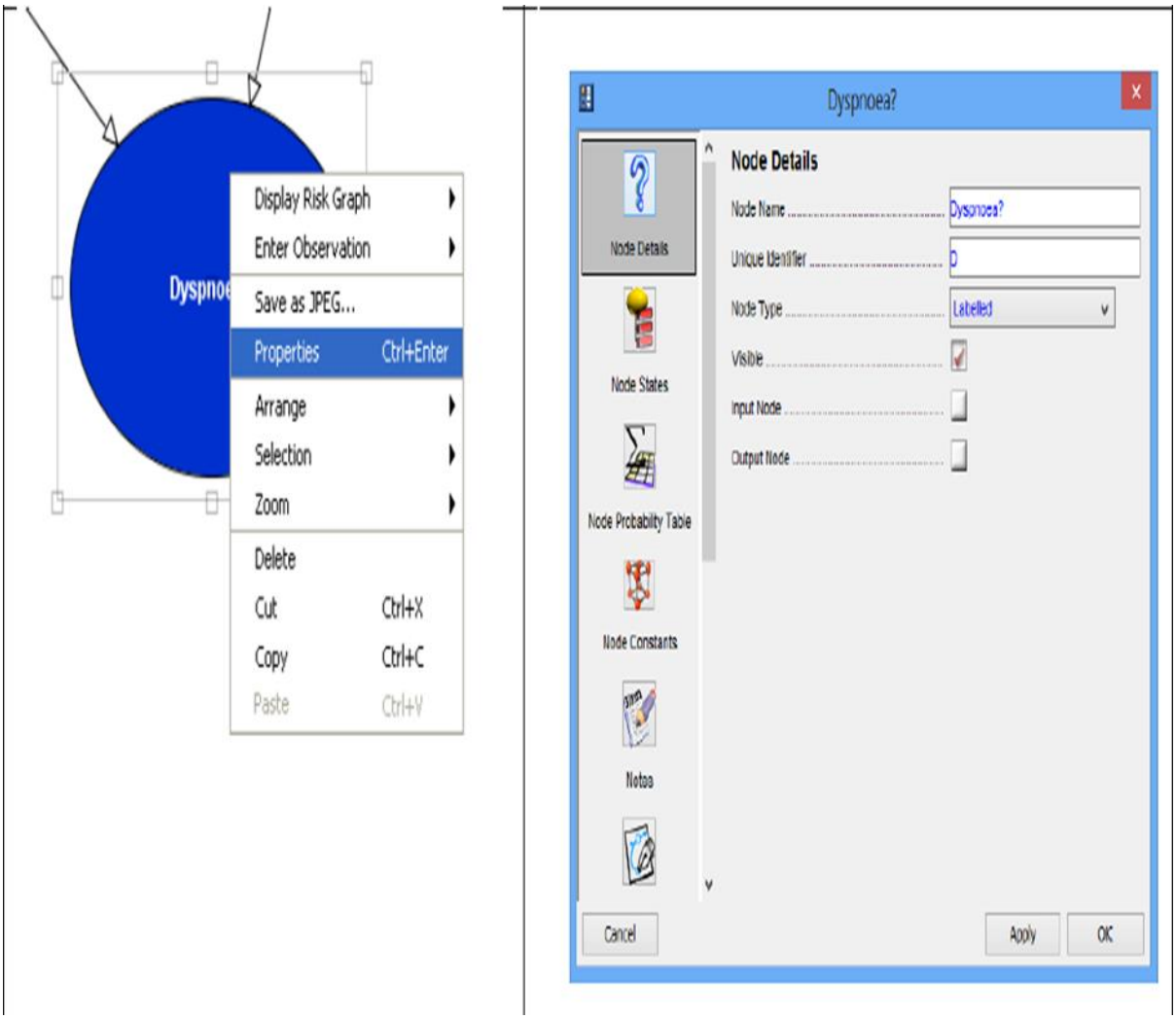


Figure 5 : l'accès aux propriétés des nœuds sur agenarisk

Dans le cas où le réseau bayésien a plusieurs nœuds, le remplissage manuel et les calculs des tables de probabilité seront trop fastidieux.

AgenaRisk nous permet de remplir et de calculer automatiquement les tables de probabilité à partir d'un fichier Excel a condition que :

Le titre unique d'identification sera identique avec le titre des colonnes sur Excel

Les composants du nœud seront identiques avec les données du paramètre sur Excel

L'extension du fichier Excel soit CSV (point-virgule) [19]

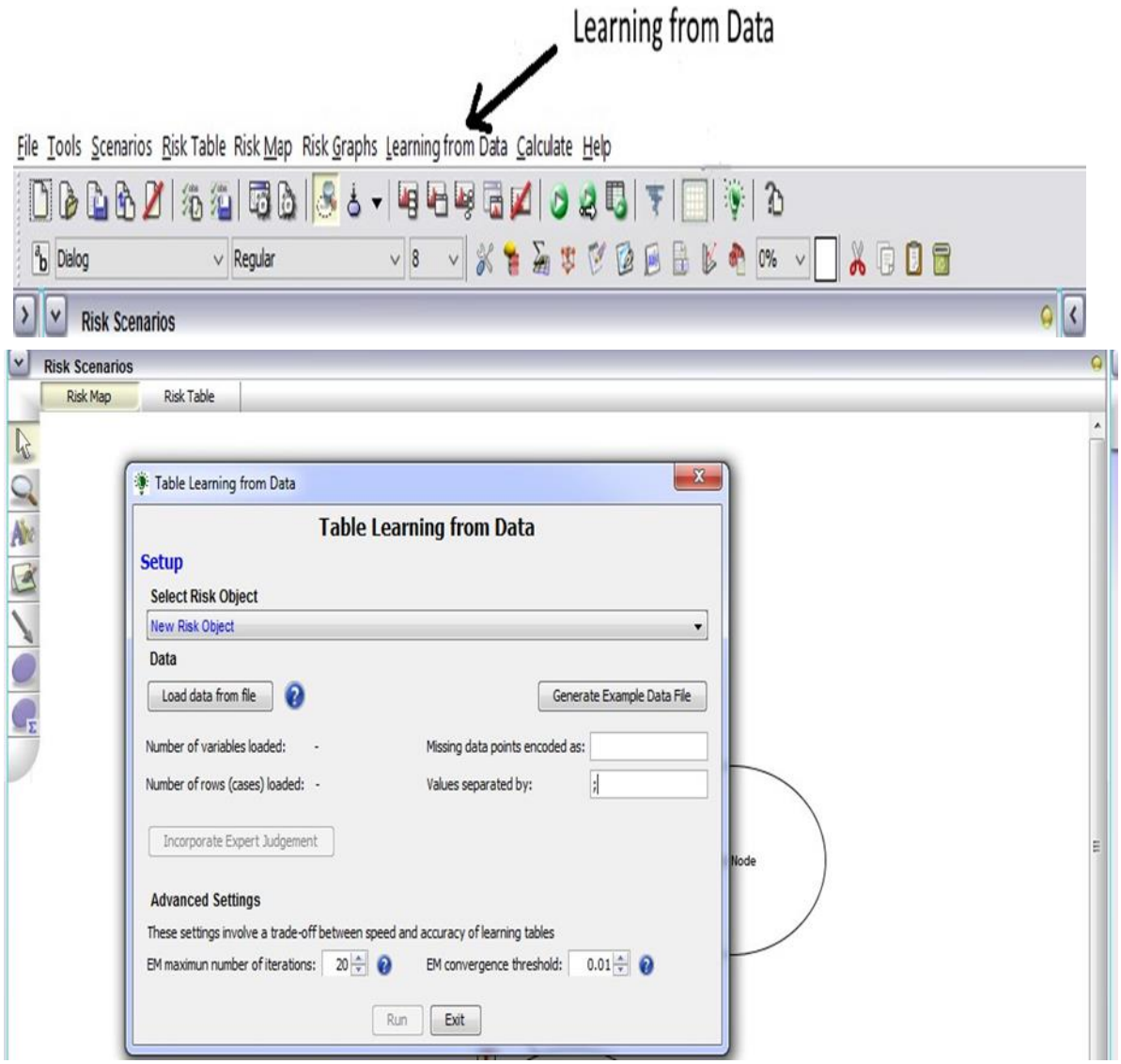


Figure 6 : importation d'un fichier Exel sur agenarisk

Utilisation des Réseaux Bayésiens

L'utilisation pratique d'un réseau bayésien peut être envisagée au même titre que celle d'autres modèles : réseau de neurones, arbre de décision, modèle d'analyse de données (régression linéaire), arbre de défaillances, modèle logique. Naturellement, le choix de la méthode fait intervenir différents critères, comme la facilité, le coût et le délai de mise en œuvre d'une solution. En dehors de toute considération théorique, les aspects suivants des réseaux bayésiens les rendent, dans de nombreux cas, préférables à d'autres modèles :

La possibilité de rassembler et de fusionner des connaissances de diverses natures dans un même modèle : retour d'expérience, expertise, observations.

La représentation graphique d'un réseau bayésien est explicite, intuitive et compréhensible par un non-spécialiste, ce qui facilite à la fois la validation du modèle, ses évolutions éventuelles et surtout son utilisation.

Un réseau bayésien est polyvalent : on peut se servir du même modèle pour évaluer, prévoir, diagnostiquer, ou optimiser des décisions, ce qui contribue à rentabiliser l'effort de construction du réseau bayésien.

Il existe aujourd'hui de nombreux logiciels pour saisir et traiter des réseaux bayésiens. Ces outils présentent des fonctionnalités plus ou moins évoluées : apprentissage des probabilités, apprentissage de la structure du réseau bayésien, possibilité d'intégrer des variables continues, et de décision, etc.

Limites des Réseaux Bayésiens

Un recul encore insuffisant pour l'apprentissage : la technique des réseaux bayésiens n'a pas immédiatement intégré l'ensemble de la problématique de l'apprentissage, comme cela avait été le cas des réseaux neuronaux. Aujourd'hui, l'essentiel de la littérature sur l'apprentissage avec des réseaux bayésiens ignore le problème de la capacité de généralisation d'un modèle, et des précautions que cela implique au moment de la construction du modèle. La prise en compte de ce problème peut s'effectuer par le choix du critère de recherche ou de distance des distributions de probabilité.

Utilisation des probabilités : L'utilisation des graphes de causalités est, une approche très intuitive. Il reste cependant que la notion de probabilité, est, au contraire, assez peu intuitive. Il est en effet assez facile de construire des paradoxes fondés sur des raisonnements probabilistes. Les modèles déterministes, formulés en termes d'entrées et de sorties, comme les modèles de régression, les réseaux de neurones, ou les arbres de décision, même s'ils peuvent être réinterprétés dans le cadre d'un formalisme probabiliste, restent d'un abord plus facile.

Lisibilité des graphes : En effet, même si la connaissance manipulée dans les réseaux bayésiens, ou extraites des données par les algorithmes d'apprentissage associés est lisible puisque représentée sous forme de graphes, elle reste moins lisible que celle représentée par un arbre de décision, par exemple, surtout si ce graphe présente un grand nombre de nœuds. Notons aussi que l'information représentée par le graphe est la structure des causalités. Les probabilités ne sont pas représentables, et on n'a donc pas d'idée, à la simple lecture du graff, de l'importance d'un arc donné.

Les variables continues : L'essentiel des algorithmes développés pour l'inférence et l'apprentissage dans les réseaux bayésiens, aussi bien que les outils disponibles sur le marché pour mettre en œuvre ces algorithmes utilisent des variables discrètes n effet, la machinerie des algorithmes d'inférence est essentiellement fondée sur une algèbre de tables de probabilités. De même, les algorithmes d'apprentissage modélisent en général les distributions de probabilité des paramètres contenus dans les tables du réseau, c'est-à-dire de probabilités discrètes. Même s'il est théoriquement possible de généraliser les techniques développées aux variables continues, il semble que la communauté de recherche travaillant sur les réseaux bayésiens n'a pas encore vraiment intégré ces problèmes. Cela pénalise cette technologie, en particulier pour des applications de data mining où variables continues.

La complexité des algorithmes : La généralité du formalisme des réseaux bayésiens aussi bien en termes de représentation que d'utilisation les rend difficiles à manipuler à partir d'une certaine taille. La complexité des réseaux bayésiens ne se traduit pas seulement en termes de compréhension par les utilisateurs. Les problèmes sous-jacents sont pratiquement tous de complexité non polynomiale, et conduisent à développer des algorithmes approchés, dont le comportement n'est pas garanti pour des problèmes de grande taille.

La tendance des publications des travaux de recherche sur les réseaux bayésiens liées à l'analyse des risques dans les revues internationales et les articles les plus important dans le temps jusqu'à 2005

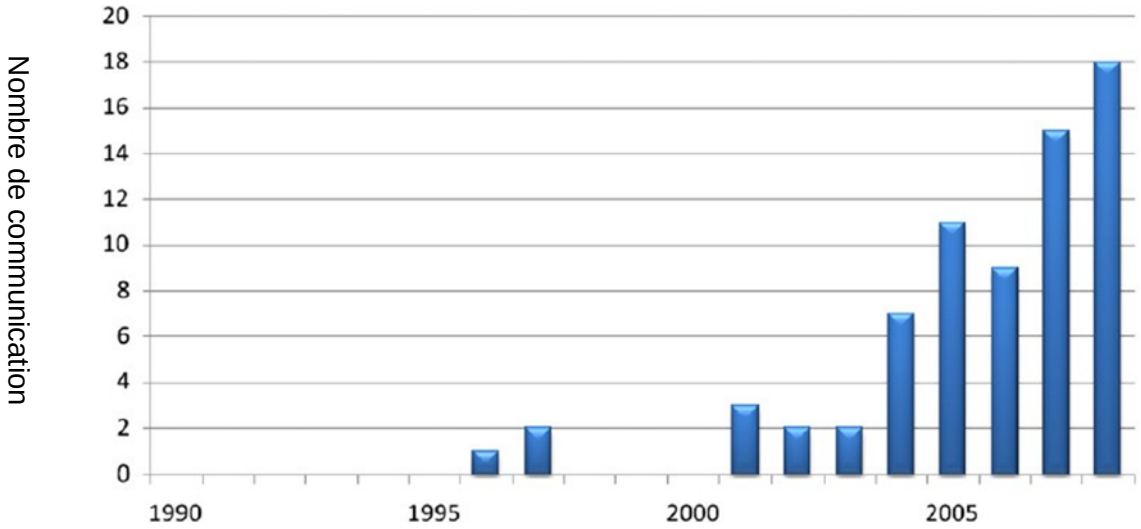


Figure 7 : tendance d'utilisation des réseaux bayésiens dans l'analyse des risques

_

Convertir l'AdD en RB

À partir des travaux de recherche recensés dans le tableau 4.3, un algorithme de construction d'un réseau bayésien (RB) à partir d'un arbre de défaillances (AdD) est proposé. Une version simplifiée de cet algorithme est présentée à la figure 4.8.

Dans cet algorithme, il est supposé que l'arbre de défaillances ne comporte que des portes logiques « OU », « ET » et « k-sur-n ». Le réseau bayésien obtenu est binaire : les variables représentent les états des composants du système et peuvent prendre deux valeurs, **Faux (F)**, correspondant à l'état de fonctionnement, et **Vrai (V)**, correspondant à l'état de défaillance.

Toutefois, cet algorithme peut être généralisé à tout type d'arbre de défaillances, quelle que soit la nature des portes logiques utilisées.

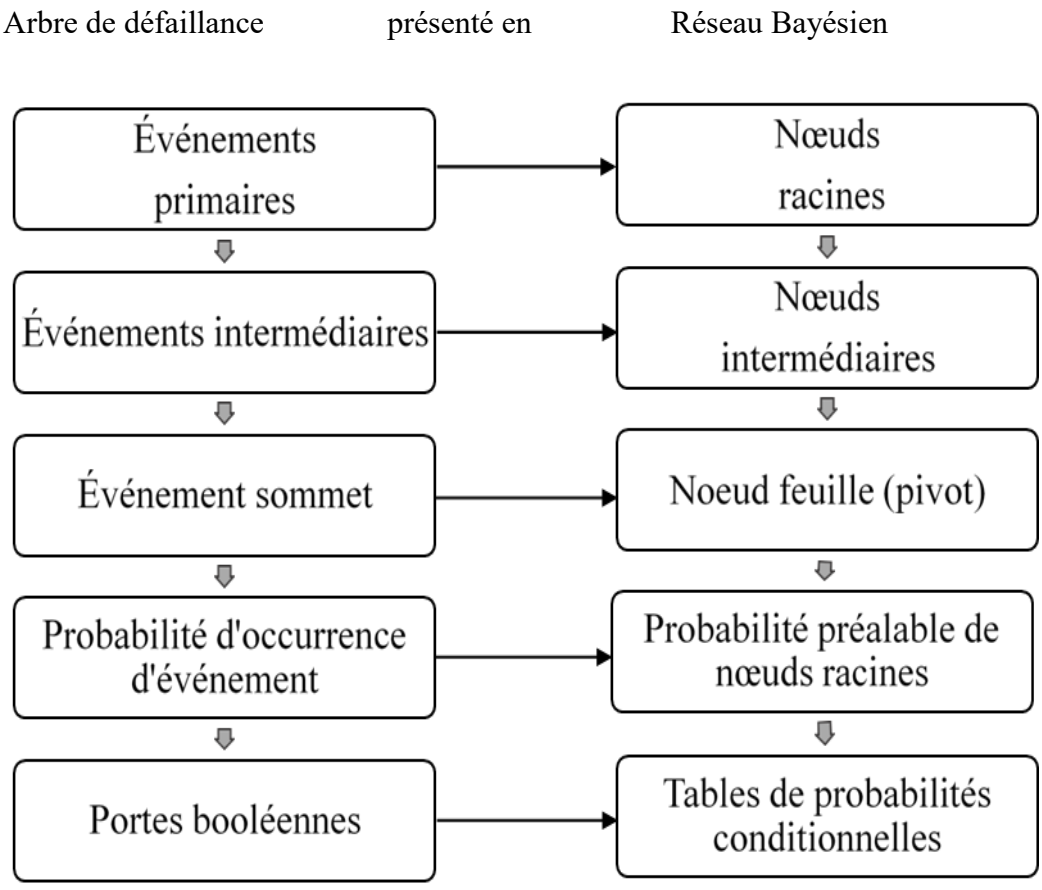


Figure 8 : Organigramme représentant un algorithme simplifie pour représenter un AdD en RB

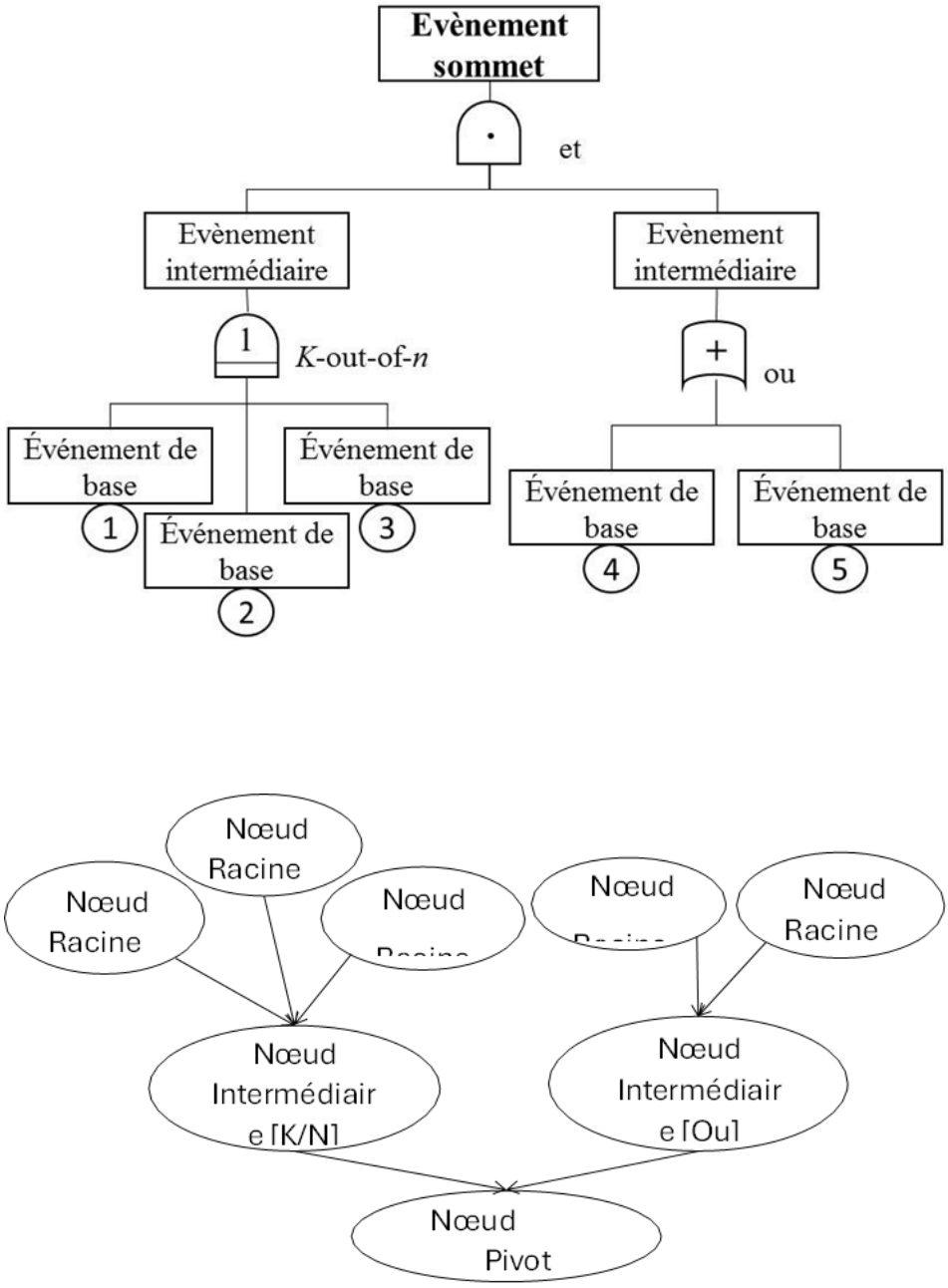


Figure 9 : Structure du réseau bayésien

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation des réseaux bayésiens et à leur utilisation dans l'analyse des risques industriels. Après avoir exposé les principes fondamentaux de cette approche probabiliste ainsi que les fonctionnalités du logiciel AgenaRisk, il a été montré que les réseaux bayésiens offrent une représentation efficace des relations de causalité entre les différents événements d'un système. Malgré certaines limites liées à la complexité des modèles

et à la manipulation des probabilités, cette méthode permet d'intégrer les incertitudes et d'améliorer la prise de décision. La conversion de l'Arbre de Défaillance vers un Réseau Bayésien constitue ainsi une approche pertinente pour l'évaluation quantitative des risques liés à l'emballement thermique.

Chapitre 4 :
Étude de l’emballement thermique

1. Présentation de la raffinerie d'Arzew :

Liste des raffineries d'Algérie :

Raffinerie d'Adrar

Raffinerie d'Alger

Raffinerie d'Arzew (Oran)

Raffinerie de Hassi Messaoud

Raffinerie de Skikda

Historique de la raffinerie d'Arzew :

La raffinerie de pétrole Arzew Oran en Algérie a une histoire qui remonte aux années 1950. Elle a été construite dans le cadre d'un accord de coopération entre l'Algérie et la France, qui visait à développer l'industrie pétrolière dans le pays.

La construction de la raffinerie a commencé en 1956, et elle a été mise en service en 1959. À l'époque, elle avait une capacité de traitement de 1,2 million de tonnes de pétrole brut par an.

Au fil des ans, la raffinerie a été agrandie et modernisée. En 1973, sa capacité de traitement avait été portée à 3,5 millions de tonnes par an. En 1982, elle a été nationalisée par le gouvernement algérien.

Depuis lors, la raffinerie d'Arzew a connu plusieurs phases d'expansion et de modernisation. En 2009, une nouvelle unité de traitement des gaz de pétrole liquéfié (GPL) a été inaugurée, portant la capacité de traitement totale de la raffinerie à 5,5 millions de tonnes par an.

Aujourd'hui, la raffinerie d'Arzew est l'une des plus grandes d'Afrique. Elle produit une gamme de produits pétroliers, notamment de l'essence, du diesel, du fioul lourd, du GPL et des lubrifiants. [21]

Situation géographique :

La raffinerie d'Arzew est située dans la zone industrielle sur le plateau d'El Mahgoune à deux kilomètres de la ville d'Arzew et environs 40 kilomètres de la ville d'Oran. Elle occupe 170 hectares et se situe au voisinage du port d'Arzew, lui permettant les enlèvements par bateau. [22]



Figure 10 : station raffinerie des Arzew [28]

Capacités de production :

La raffinerie d'Arzew traite 2.5 millions de tonnes par an de pétrole brut saharien et

280.000 tonnes de pétrole importé pour une capacité annuelle de production des différentes unités de :

15.000 tonnes de propane.

70.000 tonnes de butane.

70.000 tonnes d'essence super.

490.000 tonnes d'essence normale.

160.000 tonnes de naphta.

120.000 tonnes de kérosène.

980.000 tonnes de gazole.

550.000 tonnes de fioul BTS.

70.000 tonnes de fioul HTS.

160.000 tonnes de lubrifiant.

70.000 tonnes de graisse.

4.000 tonnes de paraffines.

120.000 tonnes de bitumes routiers.

20.000 tonnes de bitumes oxydés

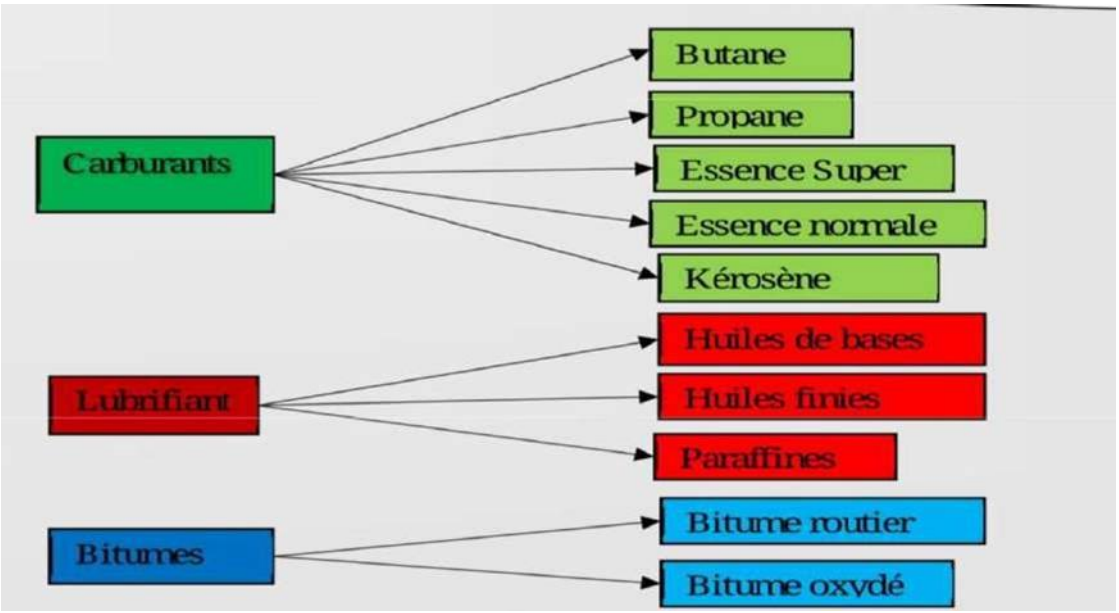


Figure 11: Capacité de production au complexe

L'objectif du complexe :

L'objectif du complexe de raffinerie d'Arzew en Algérie est de traiter le pétrole brut pour produire une gamme de produits pétroliers destinés à la consommation domestique et à l'exportation.

Plus précisément, les objectifs de la raffinerie sont les suivants :

Produire des carburants tels que l'essence et le diesel, qui sont utilisés pour alimenter les véhicules et les équipements de transport en Algérie et à l'étranger.

Produire du fioul lourd, qui est utilisé comme combustible dans les centrales électriques et les industries.

Produire du gaz de pétrole liquéfié (GPL), qui est utilisé comme combustible domestique et industriel.

Produire des lubrifiants et des produits chimiques destinés à l'industrie.

La raffinerie d'Arzew est également un important générateur de revenus pour l'Algérie, car elle exporte une grande partie de sa production vers les marchés internationaux.

2. Présentation de la principale installation de RA1Z :

La raffinerie d'Arzew comprend quatre départements de production le P1, P2, P3 et P4.

Chaque département est constitué de plusieurs zones ayant des activités spécifiques. Chaque département est composé des différentes unités de production, comme suite : I.2.5.1. Département de production P1

Ce département concerne la production des carburants, des lubrifiants et les bitumes en traitant le pétrole brut de Hassi-Messaoud comme charge et le brut réduit importé (BRI) pour la production des bitumes. Elle est constituée des zones suivantes :

Zone 03 (Les utilités)

Cette zone est construite pour l'Alimentation des autres zones en : air, vapeur, eau, électricité, et Gaz qui sont très importants pour les unités de traitement. Elle se divise en plusieurs unités :

•Unité 31 : Production de vapeur d'eau à haute pression qui sert au stripage, et Comme énergie motrice des turbos générateurs.

•Unité 32 : Production de l'eau distillée qui est utilisé comme eau d'alimentation Pour les chaudières.

•Unité 33 : Distributions d'eau de refroidissement, utilisée pour les opérations de Refroidissement des produits.

•Unité 34 : Production d'électricité qui sert à alimenter les unités de traitement.

•Unité 35 : Gaz de combustion au niveau des chaudières et des fours.

•Unité 36 : Productions d'air service et d'air instrument.

•Unité 67 : Réseaux d'incendie.

Zone 04 (Les carburants)

C'est le point de départ du procès de raffinage du pétrole brut.

Elle comprend 5 unités :

•Unité 11 : C'est l'unité de distillation atmosphérique (Topping).Elle a comme rôle la Séparation par distillation atmosphérique des différents composants contenus dans le Pétrole selon leurs densités, du plus léger au plus lourd. Il s'agit :

-Du gaz de pétrole liquéfié (LPG)

-Du naphta léger NG

-Du naphta lourd NL

-Du kérosène

-Du gasoil léger et lourd

-Le résidu atmosphérique (BRA).

•Unité 12 : (Reforming catalytique) : elle traite le naphta lourd (NL) provenant de la distillation atmosphérique dans le but de produire une base d'essence à indice d'octane élevé (reformat).

•Unité 13 :(traitement du gaz): elle traite le gaz obtenu de l'unité11, 12 et 17 en le

Séparant en produits purs, tel que le propane et le butane (C3H8, C4H10).

•Unité 17 : (l'isomérisation): elle traite le naphta léger (LG) provenant de la distillation atmosphérique, afin d'améliorer leur l'indice d'octane.

•Unité 18: (l'unité du système de l'huile chaude): le rôle de cette unité est de fournir la chaleur (par l'utilisation d'un fluide caloporteur) pour les unités 11 et 17.

Zone 07 (Les lubrifiants 1)

Cette zone a pour but la fabrication des huiles de base à partir de brut réduit atmosphérique (BRA) venant du topping (unité 11), sa capacité de production est de 50 000 T/an.

Elle comprend les unités suivantes :

•Unité 20: stockage des huiles.

•Unité 21: c'est l'unité de distillation sous vide. Elle traite le résidu provenant de l'unité 11 de la zone 4 (BRA) qui est soutiré sous vide, afin d'obtenir des huiles de base semi-finis :

-Gasoils VGO

-Huiles SPO (Spindle)

-Huiles mi-visqueuses (MVH)

-Huiles visqueuses (VO)

-Le résidu sous vide (RSV).

•Unité 22 : c'est l'unité de désasphaltage au propane. Elle traite le résidu sous vide RSV venant de l'unité 21 dans une colonne par l'extraction en utilisant le propane comme solvant, afin d'obtenir une huile désasphaltée (DAH).

•Unité 23 : unité de l'extraction au furfural

Partie pratique

3. Le reformage catalytique :

Le reformage catalytique avait à l'origine pour objectif principal de convertir des coupes pétrolières à faible indice d'octane (40 à 60), communément appelées naphtas, en bases pour le carburant à haut indice d'octane. L'amélioration de l'indice a été principalement due à une augmentation significative de la teneur en aromatiques, ce qui a conduit à l'idée d'utiliser le procédé pour produire ces aromatiques. Dans des conditions spécifiques, on travaillait alors sur une coupe d'essence choisie, dans le but de produire plus précisément des hydrocarbures pour la chimie pétrochimie. Toutefois, pour des raisons économiques et techniques, cette différence s'est diluée. Effectivement, les demandes en carburants à haute performance ont augmenté plus rapidement que celles liées à la chimie en benzène, toluène et xylènes. Les résultats de la recherche d'un indice d'octane élevé (90 à 100) associé à la teneur en aromatiques des reformats et à la sévérité du traitement ont été sensiblement similaires pour les deux types de production Plus tard, deux événements ont encore renforcé cette tendance à augmenter les rendements en composés aromatiques. C'est la mise en œuvre d'une réglementation antipollution qui recommande notamment une réduction de la teneur en plomb des essences et l'obligation de faire des économies d'énergie et pour cela de mieux valoriser les coupes pétrolières. De cette manière, les fabricants ont développé des méthodes plus spécifiques et mieux adaptées à leurs exigences, et il y a actuellement : • Pour le raffinage, des procédés de reformage opérant dans des conditions sévères, avec une plus grande stabilité de fonctionnement et des rendements en essences plus élevés. • Pour la pétrochimie, des techniques fonctionnant à plus haute température et dont la production d'aromatiques est optimisée.

Principe Au cours des quatre dernières décennies :

Le reformage catalytique du naphta a connu une évolution rapide pour devenir l'un des procédés les plus importants dans l'industrie du raffinage. Son objectif est de transformer une coupe pétrolière à faible indice d'octane (naphta lourd) en une essence à indice d'octane élevé. Pour ce faire, il est nécessaire d'isomériser les alcanes linéaires en alcanes ramifiés et d'augmenter

la teneur en composés aromatiques par déshydrogénation des Cycloalcanes ou Deshydrocyclisations des alcanes. Cette opération se déroule de manière catalytique. 16 Chapitre II Reformage Catalytique et Catalyseurs Le reformage s'effectue à une température d'environ 530°C, soit à une température plus élevée que le craquage. Le platine est utilisé comme catalyseur dans le processus, d'où le nom de "Platform ING" donné à ce type de procédé. On obtient ainsi entre 75% et 80% d'essence reformée à haut indice d'octane, des gaz liquéfiés et environ 1% en poids d'hydrogène, considéré aujourd'hui comme un précieux réactif pour l'épuration des produits par désulfuration. Le mélange obtenu contient une quantité significative de composés aromatiques tels que le benzène, le toluène et le xylène, qui sont des constituants essentiels de certaines essences et des matières premières de l'industrie chimique. L'opération de reformage catalytique est menée sous une pression de 10 à 20 atmosphères en présence d'hydrogène produit par la réaction, ce qui permet d'éviter la formation de coke.

Les différentes réactions mises en jeu

Les types et mécanismes des principales réactions produites dans un processus de reformage catalytique ont été cités par plusieurs travaux.

Le processus de reformage catalytique et donc l'augmentation de la teneur en aromatiques aux dépens des autres hydrocarbures impliquent quatre réactions élémentaires :

Déshydrogénation des naphtènes en HC aromatiques

Un exemple de cette réaction est donné ci-dessous :

$$\mathbf{CnH_2n{+}2 \rightarrow CnH_2n + H_2}$$

Cette réaction permet d'obtenir des concentrations très élevées en NO. Fortement endothermique ($\Delta H = 210$ kJ/mol), elle est favorisée par une augmentation de la température et une diminution de la pression. Sur le plan cinétique, elle est la plus rapide parmi les différentes réactions de reformage.

Deshydrocyclisations des Paraffines

$$\mathbf{CnH_2n{+}2 \rightarrow CnH_2n{-}6 + 4H_2}$$

Cette réaction est encore plus endothermique que la réaction de déshydrogénation ($\Delta H = 250$ kJ/mol). En revanche, sa cinétique est plus lente ; elle est donc favorisée par des températures plus élevées et des pressions plus faibles [23].

4. Le procède de reformage catalytique semi régénératif

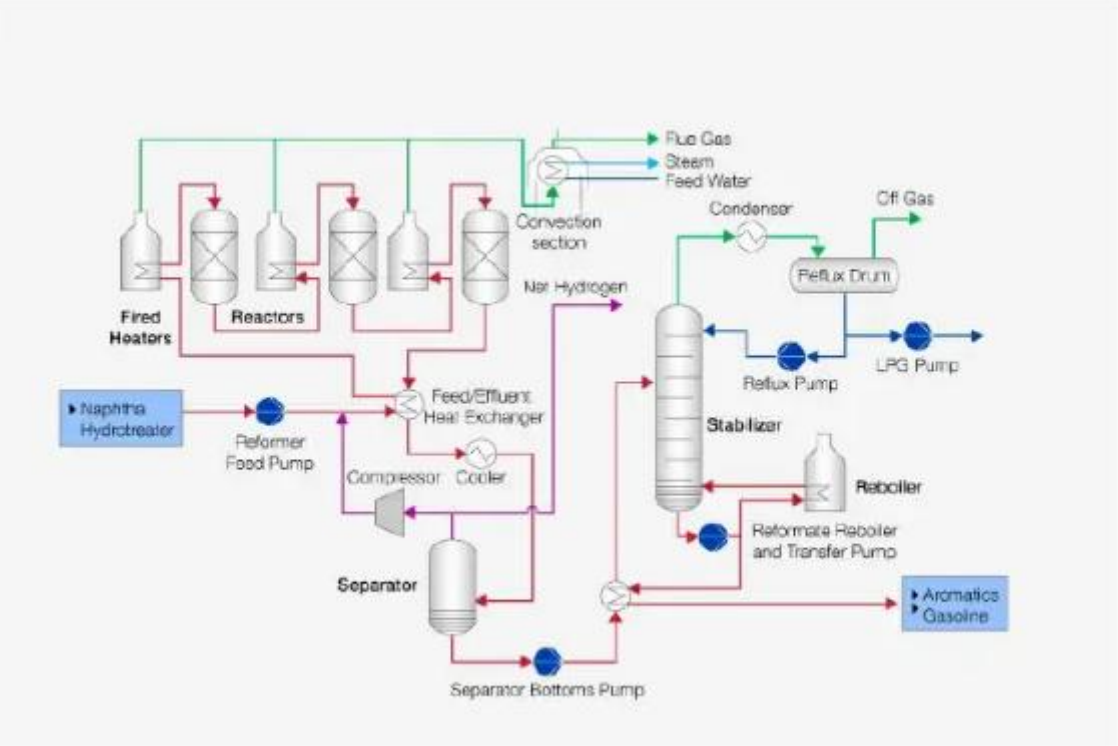


Figure 12 procède du reformage catalytique [26]

5. Pourquoi réseau bayésien et ADD

Le choix de l'Analyse par Arbre de Défaillance (ADD) et du Réseau Bayésien (RB) comme méthodes d'analyse de l'emballement thermique repose sur leur capacité à réaliser à la fois une étude qualitative et quantitative du risque. En effet, l'emballement thermique constitue un phénomène complexe impliquant plusieurs causes interdépendantes d'origine technique, humaine et organisationnelle. L'ADD permet tout d'abord une analyse qualitative en représentant de manière logique les enchaînements de défaillances pouvant conduire à l'événement redouté. Cette méthode facilite l'identification des causes critiques, des combinaisons de pannes et des coupes minimales responsables du phénomène dangereux. Par ailleurs, l'ADD peut également être utilisée dans une approche quantitative grâce au calcul des probabilités d'occurrence des événements et de l'indisponibilité du système.

Le Réseau Bayésien complète cette analyse par une approche probabiliste plus avancée. Il permet non seulement de représenter les relations de dépendance entre les variables du système, mais également d'effectuer une analyse quantitative dynamique basée sur les probabilités conditionnelles. Le RB offre ainsi la possibilité de mettre à jour les probabilités en fonction de

nouvelles données ou observations, ce qui améliore la précision de l'évaluation du risque d'emballement thermique.

En revanche, des méthodes telles que l'AMDEC, le HAZOP ou l'APR sont principalement orientées vers une analyse qualitative ou semi-quantitative. Elles sont particulièrement efficaces pour identifier les dangers, les écarts de fonctionnement et les modes de défaillance, mais elles restent limitées dans l'évaluation probabiliste détaillée et dans la modélisation des dépendances complexes entre événements. Ainsi, l'association de l'ADD et du Réseau Bayésien constitue une approche plus complète et adaptée à l'étude de l'emballement thermique, car elle combine une analyse structurée des causes avec une évaluation quantitative approfondie du risque

Construction de l'arbre de défaillance

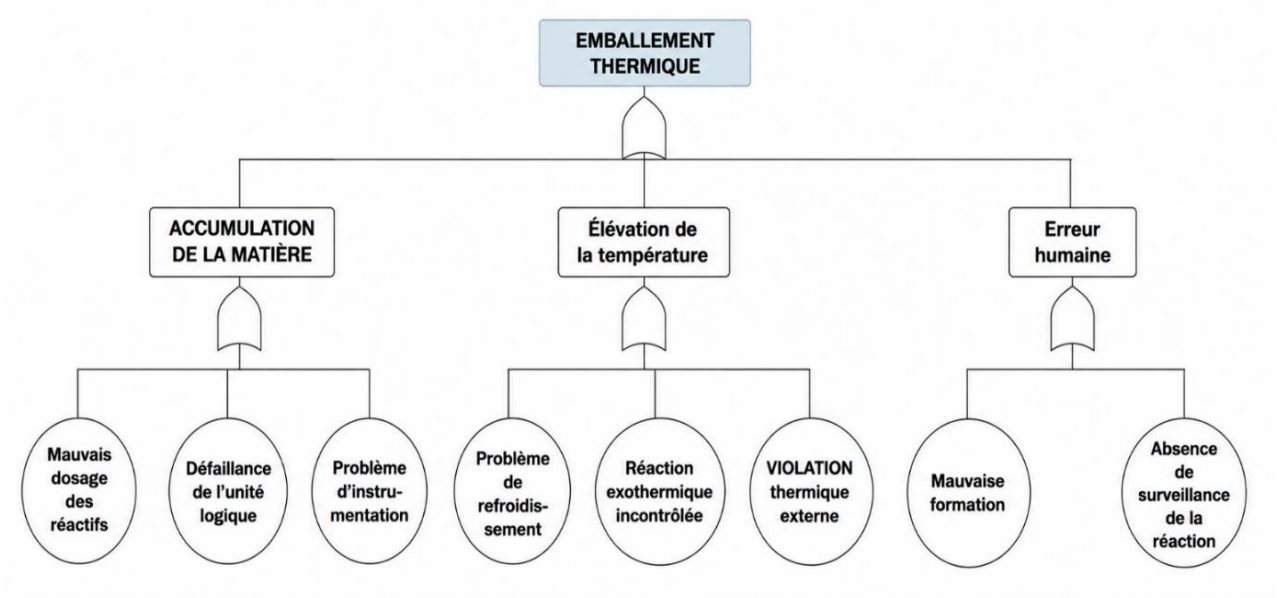


Figure 13 : arbre de défaillance d'un événement redoute emballement thermique

1. Mauvais dosage des réactifs (A)

$$P(A) = 1 - e - (12{,}4 \times 10 - 6 \times 8760) = 1 - e - 0{,}108624 \approx 0{,}1030$$

2. Défaillance de l'unité logique (B)

$$P(B) = 1 - e^{-(0{,}85 \times 10^{-6} \times 8760)} = 1 - e^{-0{,}007446} \approx 0{,}0074$$

3. Problème d'instrumentation (C)

$$P(C) = 1 - e^{-(3{,}1 \times 10^{-6} \times 8760)} = 1 - e^{-0{,}027156} \approx 0{,}0268$$

4. Problème de refroidissement (D)

$$P(D) = 1 - e^{-(28{,}1\times10^{-6}\times8760)} = 1 - e^{-0{,}246156} \approx 0{,}2182$$

5. Réaction exothermique incontrôlée (E)

$$P(E) = 1 - e^{-(8{,}6\times10^{-6}\times8760)} = 1 - e^{-0{,}075336} \approx 0{,}0726$$

6. violation thermique externe (F)

$$P(F) = 1 - e^{-(0{,}5\times10^{-6}\times8760)} = 1 - e^{-0{,}004380} \approx 0{,}0044$$

7. Mauvaise formation (G)

$$P(G) = 1 \times 10^{-2} = 0.01$$

8. Absence de surveillance de la réaction (H)

$P(H) = 5 \times 10^{-3} = 0.005$ [25]

Équations intermédiaires

Accumulation de matière $PC1$

$$PC1 = (A + B + C)$$

C'est une porte OÙ :

$$P(C1) = 1 - (1 - P(A))(1 - P(B))(1 - P(C))$$

$$P(C1) = 1 - (1 - 0{,}1030)(1 - 0{,}0074)(1 - 0{,}0268)$$

$$\boxed{P(C1) = 0.1336}$$

Élévation de température $PC2$

C'est une porte OÙ :

$$PC2 = (D + E + F)$$

Donc :

$$P(C2) = 1 - (1 - P(D))(1 - P(E))(1 - P(F))$$

Application :

$$P(C2) = 1 - (1 - 0{,}2182)(1 - 0{,}0726)(1 - 0{,}0044)$$

$$P(C2) = 1 - (0.97 \times 0.98 \times 0.99)$$

$$P(C2) = 1 - 0.941094$$

$$\boxed{P(C2) = 0.2782}$$

Erreur humaine $PC3$

Vous avez :

$$PC3 = (G \cdot H)$$

Comme c'est une porte ET :

$$P(C3) = P(G) \times P(H)$$

Application :

$$P(C3) = 0.01 \times 0.005$$

$$\boxed{P(C3) = 0.00005}$$

Équation totale de l'événement principal

L'événement principal est :

$$P(T) = C1 + C2 + C3$$

Donc avec une porte OÙ :

$$P(T) = 1 - (1 - P(C1))(1 - P(C2))(1 - P(C3))$$

$$P(T) = 1 - (1 - 0.1336)(1 - 0.2782)(1 - 0.00005)$$

$$P(T) = 1 - (0.8664 \times 0.7218 \times 0.99995)$$

$$P(T) = 1 - 0.6253$$

$$\boxed{P(T) = 0.3747}$$

Résultats et discussion

L'analyse de l'arbre de défaillance montre que la probabilité d'occurrence de l'événement redouté « emballement thermique » est de 0,3747. 48 CHAPITRE 4: étude d'emballement thermique Parmi les événements de base étudiés, le problème de refroidissement présente la probabilité d'occurrence la plus élevée (P = 0,2182). Il constitue donc le facteur le plus critique susceptible de conduire à l'emballement thermique du réacteur. En effet, une défaillance du système de refroidissement favorise l'accumulation de chaleur produite par la réaction, ce qui

entraîne une augmentation rapide de la température et peut provoquer une perte de contrôle du procédé.

Construction du réseau bayésien

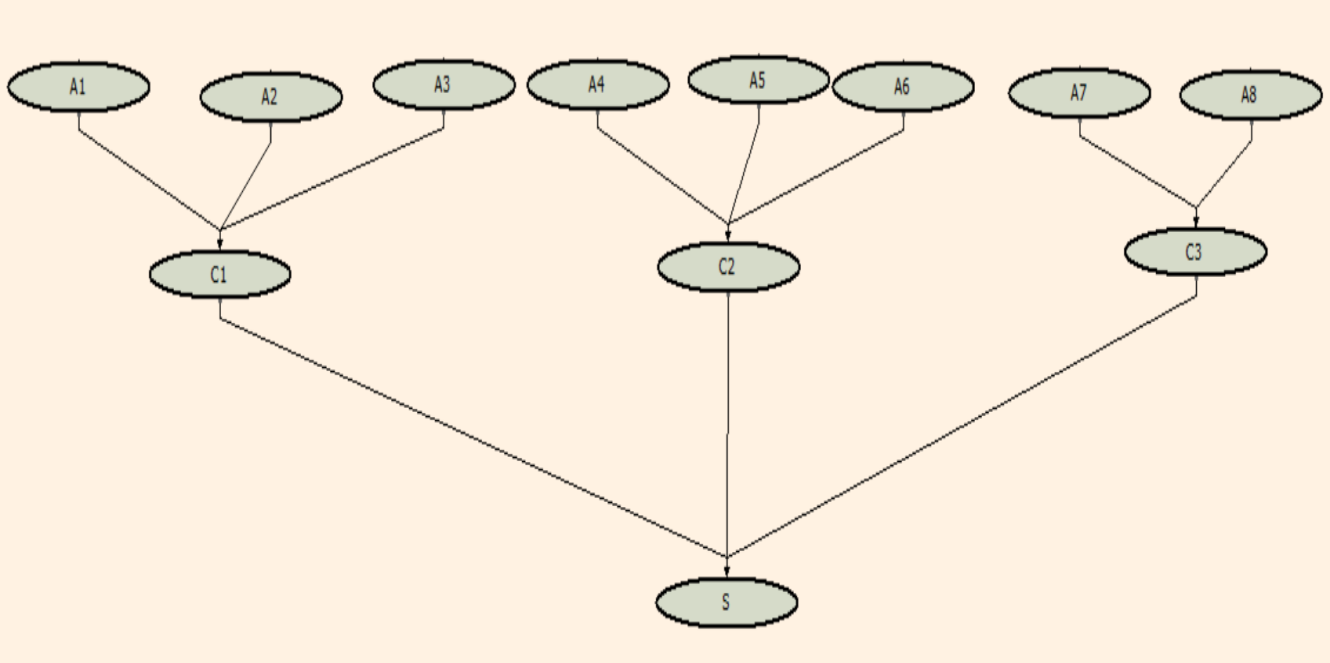


Figure 14 : réseau bayésien

Définition des nœuds

Tableau 3 définition des nœuds

Le code de la nœuds	Le mode défaillance
A1	Mauvais dosage des réactifs
A2	Défaillance de l'unité logique
A3	Problème d'instrumentation
A4	Problème de refroidissement
A5	Réaction exothermique incontrôlée
A6	Violation thermique externe
A7	Mauvaises formation
A8	Absence de surveillance de la réaction
C1	Accumulation de matière
C2	Élévation de température

C3	Erreur humaine
S	Emballement thermique

Les calculs des probabilités par la modélisation de RB :

En utilisant le logiciel de modélisation MSBNX

La probabilité de l'Accumulation de matière 0,1335

La probabilité de l'élévation de température 0,01495

La probabilité de l'erreur humaine 0,278149

Les résultats de la probabilité d'occurrence de l'emballement thermique O,387301

Les résultats des calcule de probabilité a postériori

Tableau 4 : probabilité d'apparition de la composante

Composante	Probabilité	Oui	No	Posteriori
Mauvais dosage des réactifs	0,1030	1	0,313118	0,68682
Défaillance de l'unité logique	0,0074	1	0,382733	0,617267
Problème d'instrumentation	0,0268	1	0,370429	0,629571
Problème de refroidissement	0,2182	1	0,216297	0,783703
Réaction exothermique incontrôlé	0,0726	1	0,339337	0,660663
Violation thermique extérieur	0,0044	1	0,384593	0,615404
Mauvaise formation	0.01	1	0,381112	0,618888
Absence de la surveillance de la réaction	0.005	1	0,38422	0,61578

Discutions des résultats de réseau bayésien

Le réseau bayésien a permis d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'emballement thermique ainsi que l'influence de chaque événement de base sur cet événement redouté. L'analyse des probabilités a posteriori révèle que le problème de refroidissement possède la plus forte influence sur l'apparition de l'emballement thermique, avec une probabilité a posteriori de 0,783703. Cela signifie que lorsqu'une défaillance du système de refroidissement est observée, la probabilité que l'emballement thermique se produise augmente considérablement.

Comparaison des ADD avec les RB

L'analyse de l'arbre de défaillance montre que la probabilité d'occurrence de l'événement redouté « emballement thermique » est de 0,3747. Parmi les événements de base étudiés, le problème de refroidissement présente la probabilité d'occurrence la plus élevée (P = 0,2182). Il constitue donc le facteur le plus critique susceptible de conduire à l'emballement thermique du réacteur. En effet, une défaillance du système de refroidissement favorise l'accumulation de chaleur produite par la réaction, ce qui entraîne une augmentation rapide de la température et peut provoquer une perte de contrôle du procédé.

Le réseau bayésien a permis d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'emballement thermique ainsi que l'influence de chaque événement de base sur cet événement redouté. L'analyse des probabilités a posteriori révèle que le problème de refroidissement possède la plus forte influence sur l'apparition de l'emballement thermique, avec une probabilité a posteriori de 0,783703. Cela signifie que lorsqu'une défaillance du système de refroidissement est observée, la probabilité que l'emballement thermique se produise augmente considérablement.

Si l'Arbre de défaillance reste un outil figé d'évaluation avant conception, le Réseau Bayésien est un outil vivant d'aide à la décision en temps réel. Sa force principale réside dans sa capacité à faire du diagnostic instantané : dès qu'une anomalie est détectée sur le terrain, il recalcule immédiatement la mise à jour des risques sur l'ensemble du procédé.

Les mesures de prévention et de protection

D'après l'étude réalisée en remarque que la criticité de problème de refroidissement est très élevé il est nécessaire d'améliorer la fiabilité du system de refroidissement et mettre en place une alerte en cas de défaillance ou en cas d'augmentation de la température.

Mettre en place un system de refroidissement secoure en cas de défaillance.

Autre mesure de prévention et protection

Les mesures préventives

Les mesures préventives constituent la première ligne de défense contre les réactions chimiques incontrôlées. Voici quelques mesures préventives importantes à envisager :

Conception intrinsèquement plus sûre :

Concevoir un procédé chimique ou un réacteur doté de caractéristiques intrinsèquement plus sûres permet de réduire le risque d'emballement réactionnel. Cela peut impliquer l'utilisation de moins de matières dangereuses, la conception d'une voie réactionnelle plus stable ou l'utilisation de contrôles automatiques pour prévenir les pics de température ou de pression.

Évaluation des risques :

Une évaluation approfondie des risques permet d'identifier les dangers potentiels et de déterminer la probabilité et les conséquences d'une réaction incontrôlée. Elle contribue à la conception du procédé ou du réacteur et permet de définir les mesures de sécurité nécessaires.

Formation et procédures de sécurité :

Une formation adéquate et des procédures de sécurité appropriées sont essentielles pour prévenir les accidents. Tous les employés doivent être formés aux dangers potentiels des produits chimiques qu'ils manipulent et aux procédures de sécurité à suivre pour éviter les accidents.

Planification des mesures d'urgence

Malgré tous nos efforts pour éviter une réaction excessive, des situations d'urgence peuvent toujours survenir. Voici quelques mesures importantes à prendre en compte dans le cadre d'un plan d'urgence :

Plan d'intervention d'urgence :

L'élaboration d'un plan d'intervention d'urgence permet de s'assurer que chacun sait comment réagir en cas d'urgence. Ce plan doit inclure les procédures d'évacuation de la zone, d'arrêt du réacteur et d'alerte des services d'urgence.

Équipement d'urgence :

Disposer de l'équipement d'urgence adéquat peut contribuer à atténuer les conséquences d'une réaction incontrôlée. Cet équipement peut comprendre des systèmes d'extinction d'incendie, des systèmes de ventilation d'urgence et des équipements de protection individuelle.

Exercices et formations réguliers :

Des exercices et des formations réguliers permettent de s'assurer que chacun sait comment réagir en cas d'urgence. Cela peut inclure la pratique des procédures d'arrêt d'urgence, des évacuations et de l'utilisation du matériel d'urgence.

En mettant en œuvre ces mesures préventives et ces plans d'intervention d'urgence, vous pouvez contribuer à minimiser les risques associés aux réactions chimiques incontrôlées et vous assurer d'être prêt à gérer toute situation d'urgence qui pourrait survenir.

Mesure de protection

Systèmes instrumentés de sécurité (SIS) :

Ces systèmes automatisés analysent les données et peuvent déclencher des arrêts d'urgence ou injecter des inhibiteurs de polymérisation dès qu'une dérive thermique est détectée

Systèmes de refroidissement :

Maintien d'un débit constant dans les échangeurs de chaleur et disponibilité de circuits de refroidissement de secours (eau ou fluides caloporteurs) pour absorber les pics de chaleur exothermique.

Agitation et mélange :

Dans les réacteurs chimiques (ex: alkylation), une agitation optimale empêche la stagnation et la création de "points chauds" locaux.

Soupapes de sûreté et disques de rupture :

En cas d'augmentation rapide et incontrôlable de la pression due à un emballement, ces dispositifs libèrent les gaz et fluides vers des réseaux fermés (ou des torches) pour éviter l'explosion de l'équipement.

Inertage :

L'ajout d'azote ou d'autres gaz inertes permet de réduire la concentration en oxygène, empêchant ainsi tout risque d'inflammation accidentelle dans les réservoirs ou les colonnes.

Injection de fluides de trempe :

En cas de montée anormale de la température, le système peut injecter un produit chimique froid ou un solvant spécifique qui va stopper la réaction exothermique en absorbant la chaleur de manière drastique.

Systèmes déluge d'eau :

Des lances à eau automatiques sont installées autour des équipements critiques pour refroidir les parois métalliques et éviter la propagation du feu aux installations voisines en cas d'incident

Conclusion :

Ce chapitre a présenté l'étude de cas réalisée au niveau de l'unité d'extraction au furfural de la raffinerie d'Arzew, portant sur l'analyse du risque d'emballement thermique dans un réacteur chimique.

L'étude s'est appuyée sur deux approches complémentaires, l'arbre de défaillances et le réseau bayésien, afin d'identifier, d'évaluer et d'analyser les causes susceptibles de conduire à un emballement thermique. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les facteurs de risque les plus critiques, en mettant particulièrement en évidence le rôle déterminant des défaillances du système de refroidissement. Les probabilités a posteriori, calculées à l'aide du réseau bayésien, confirment l'importance de cet événement dans le déclenchement de l'emballement thermique.

Sur la base de ces résultats, plusieurs mesures de prévention et de protection ont été proposées, notamment le renforcement de la maintenance préventive du système de refroidissement, le contrôle rigoureux des paramètres opératoires, l'amélioration de la fiabilité de l'instrumentation ainsi que la formation continue du personnel.

Cette étude démontre que la combinaison de l'arbre de défaillances et du réseau bayésien constitue une approche pertinente et efficace pour l'identification, l'évaluation et la maîtrise des risques liés à l'emballement thermique dans les installations industrielles. Elle permet non seulement d'améliorer la compréhension des mécanismes de défaillance, mais également d'apporter une aide à la décision pour la mise en œuvre de stratégies de prévention et de protection adaptées.

Conclusion générale

L'emballement thermique constitue l'un des phénomènes les plus critiques dans l'industrie chimique et pétrochimique en raison de ses conséquences potentiellement graves sur les installations, le personnel et l'environnement. Ce travail a permis d'étudier les mécanismes de l'emballement thermique, ses causes, ses conséquences ainsi que les principaux accidents industriels qui lui sont associés.

L'étude de cas réalisée au niveau de l'unité d'extraction au furfural de la raffinerie d'Arzew a permis d'identifier les principales causes susceptibles de conduire à un emballement thermique, notamment la défaillance du système de refroidissement, les erreurs opérationnelles, les dysfonctionnements des équipements de contrôle et les réactions exothermiques incontrôlées.

L'application de l'Arbre de Défaillance (ADD) a permis de structurer les différents scénarios pouvant mener à l'événement redouté et de mettre en évidence les événements critiques contribuant à son apparition. La transformation de l'ADD en réseau bayésien a ensuite permis de quantifier les probabilités associées aux différents scénarios et d'analyser les relations entre les facteurs de risque.

Les résultats obtenus montrent que les réseaux bayésiens constituent un outil efficace pour l'analyse probabiliste des risques liés à l'emballement thermique. Ils permettent une meilleure représentation des dépendances entre les événements et facilitent la mise à jour des probabilités lorsque de nouvelles informations sont disponibles.

Enfin, cette étude met en évidence l'importance de la mise en œuvre de mesures préventives adaptées, telles que la maintenance régulière des systèmes de refroidissement, l'amélioration des dispositifs de surveillance et de contrôle, ainsi que la formation continue du personnel. Ces actions contribuent à réduire le risque d'emballement thermique et à renforcer la sécurité des procédés industriels.

Comme perspective, il serait intéressant d'intégrer des données réelles d'exploitation afin d'affiner davantage le modèle bayésien et d'améliorer la précision de l'évaluation des risques au sein des installations industrielles.

SOURCE BIBIOGHRAPHIE

[1] https://metisengineering.com/fr/understanding-thermal-runaway/?srsltid=AfmBOoovqDPaFDSWrb7qUZFVpY8JLXNK1qHPIr_yGl_xihVU3yHkkBGE

[2] Fiche sécurité des procédés chimiques – INERIS

[3] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/reacteurs-chimiques-42330210/distribution-des-temps-de-sejour-et-efficacite-des-reacteurs-chimiques-j4014/definition-et-principales-proprietes-des-distributions-des-temps-de-sejour-j4014niv10001.html

[4] https://metisengineering.com/fr/understanding-thermal-runaway

[5] https://www.labbe-france.fr/reacteur-industriel/

[7] https://www.novethic.fr/lexique/detail/bhopal.html

[8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Explosion_de_l%27usine_AZF_de_Toulouse

[9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Directive_Seveso

[10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Flixborough

[11] Fiche sécurité des procédés chimiques – INERIS

[12] Fiche sécurité des procédés chimiques – INERIS

[13] https://fr.scribd.com/document/615593568/Outils-d-analyse-des-risques-generes-par-une-installation-industrielle-INERIS-2003

[14] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/extract/Encyclopedia/se4030?offerId=ti112

[15] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/lemouchi_halima/files/chap3_apr.pdf

[16] https://ds.univ-oran2.dz:8443/jspui/bitstream/123456789/7920/1/M%C3%A9moire_Les%20arbres%20de%20d%C3%A9faillances%20non%20coh%C3%A9rents.pdf

[17] https://www.google.com/url?q=https://www.blog-qhse.com/analyse-des-risques-la-methode-amdec-pour-anticiper-les-defaillances

[18] Zaidi, A. 2012. Intégration des réseaux bayésiens et bond graphes pour la supervision des systèmes dynamiques. (Thèse de doctorat).Université de Lille 1

[19] mÃ©moire-fin-detude-2017.pdf

[20]1_ThÃ¨se_de_Doctorat_LMD_Analyse_quantitative_des_risque_1.pdf

[21] site web:de la société de raffinage d'Algérie (SARA) consulte le 23 avril 2021

[22] https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1405699

[23] https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/34513/1/memoire%20BERREJOUH%20et%20Rabhi%2021.06.2023_compressed.pdf

[24] ARIA : base de données sur les accidents technologiques accessible par www.aria.developpementdurable.gouv.fr

[25] OREDA, Offshore Reliability Data Handbook, 4e éd., vol. 1, Topside Equipment. Høvik, Norvège : Participants OREDA, 2002.

[25] Giovannini, B., Etude bibliographique relative au développement de réactions chimiques non contrôlées dans l'industrie, Rapport INERIS- DRA - 2000 - CGR23414, Juin 2000

[26] https://www.scribd.com/document/610276698/Reformage-catalytique?_gl=1*txddpo*_up*MQ..*_ga*Nzc3MDIzOTAyLjE3ODI5ODAxMzY.*_ga_Z4ZC50DED6*czE3ODI5ODAxMzUkbzEkZzEkdDE3ODI5ODAxMzUkajYwJGwwJGgw*_ga_8KZ8BV0P5W*czE3ODI5ODAxMzUkbzEkZzEkdDE3ODI5ODAxMzUkajYwJGwwJGgw

[27]https://www.google.com/search?q=seveso+disaster&sca_esv=b24d33f0b7e2f9cd&udm=2&biw=1280&bih=585&sxsrf=APpeQnu3BUi6EExEnJX-k66d00z4gI9

[28] Algérie presse service