



Faculté des sciences de l'ingénierat

Département Electromécanique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

**ANALYSE DU COMPORTEMENT DE SYSTEMES INDUSTRIELS
PAR LES RESEAUX BAYESIENS POUR LA PREVENTION DES
SCENARIOS INDESIRABLES**

Présentée et soutenue publiquement : Le 28 Février 2018

Option : Sécurité industrielle

Par :

Bilal ZEROUALI

DIRECTEUR DE THESE : Mohammed KARA MCA U. Larbi Tébessi, Tébessa

CO-DIRECTEUR DE THESE: Brahim HAMAIDI Pr U. Badji Mokhtar, Annaba

Devant le jury :

Qualité	Grade	Nom	Prénom	Rattachement
Président :	Pr.	Haddouche	Ali	U - Badji Mokhtar – Annaba
Rapporteur :	MCA.	Kara	Mohammed	U - Larbi Tebessi – Tebessa
Co-rapporteur :	Pr.	Hamaidi	Brahim	U - Badji Mokhtar – Annaba
Examineur :	Pr.	Hadjadj	Aoul Elias	U - Badji Mokhtar – Annaba
Examineur :	Pr.	Chenikher	Salah	U - Larbi Tebessi – Tebessa

Remerciement

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de cette thèse.

En premier lieu, je remercie M. Mohammed KARA, de l'université de Tébessa. En tant que Directeur de thèse, il m'a guidé dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer.

Je remercie aussi M. Brahim HAMAIDI de l'université d'Annaba qui a également contribué à la direction de ce travail, et qui m'a soutenu, encouragé, et avec qui j'ai établi une relation de confiance.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Ali HADDOUCHE, Professeur à l'université d'Annaba pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Mes remerciements vont également à Messieurs : Aoul Elias HADJADJ, Professeur à l'université d'Annaba, et Saleh CHENIKHER, Professeur à l'université de Tébessa, pour avoir accepté de faire partie du jury.

Je n'oublierai pas de remercier ma famille et mes amis, pour le soutien moral qu'ils m'ont apporté pour mener à bien ce doctorat.

Résumé

Les pipelines sont les principaux moyens de transport des hydrocarbures, des puits de forage et complexes de raffinage vers les centres de distribution. Des milliers d'accidents ont été signalés sur des pipelines au cours des deux dernières décennies, dont la plupart ont eu des conséquences considérables. Les échecs et les ruptures récents ont soulevé des inquiétudes sur le risque de défaillance de ces tuyaux en Algérie. L'objectif principal de cette recherche est d'élaborer un modèle probabiliste axé sur les risques liés au transport des hydrocarbures par pipelines. La recherche développe un modèle de prédiction de la probabilité de défaillance ainsi que celui de feu et explosion des pipelines et les probabilités de leurs conséquences.

L'amélioration constante des mesures de sécurité ; en particulier dans le domaine des hydrocarbures ; reste une préoccupation majeure étant donné que les accidents ont été et demeurent l'une des principales causes du nombre croissant de victimes tels que les morts, les blessés et les évacués. Par conséquent ; dans le travail en cours ; nous essayons de focaliser la lumière sur les façons de développer une méthode pour l'évaluation des risques de feu et d'explosion des pipelines. Les causes de ces dernières et leurs conséquences sont, d'une part, analysées au moyen des méthodes d'arbre de défaillance et de nœud papillon et d'autre part, une analyse quantitative mettant en œuvre les réseaux bayésiens est utilisée pour estimer la probabilité d'occurrence de l'événement indésirable. En outre, 72 événements de base ont été trouvés pour en estimer comme causes primaires provoquant l'occurrence d'événements indésirables. Cependant, certains experts ont souvent de la difficulté à déterminer précisément les probabilités d'occurrence des événements de base de l'arbre de défaillance. Dans le but d'évaluer l'occurrence de chaque événement de base, nous avons utilisé les techniques de la logique floue. Ainsi, à la fin de l'étude, nous avons pu développer un modèle qui pourrait nous aider à évaluer les risques accompagnant les feux et l'explosion des pipelines ainsi que les conséquences.

Mots clés : Réseau bayésien, nœud papillon, logique floue, feu et explosion des pipelines.

Abstract

Pipelines are the primary means of transporting hydrocarbons from drilling wells and refinery complexes to distribution centers. Thousands of accidents have been reported on pipelines over the past two decades, most of which have had considerable consequences. Recent failures and ruptures have raised concerns about the risk of failure of these pipes in Algeria. The main objective of this research is to develop a probabilistic model focused on the risks associated with the transportation of hydrocarbons by pipelines. The research develops a model of prediction of the probability of failure and the probability of fire and explosion of pipelines and the probabilities of their consequences.

As accidents were and still one of the main reasons standing behind the increasing rates of casualties such as death, injuries, and evacuations, the constant improvement of safety measures especially in the field of hydrocarbons remains a major concern. Therefore, in the work in hand, we attempt to shed the light on the ways of developing a method for the evaluation of risks of fire and explosions of pipelines. The causes of the latter and consequences are, in one hand, analysed by means of fault tree and bow tie methods. On the other hand, a quantitative analysis implementing the Bayesian networks is used to estimate the probability of occurrence of the adverse event. Moreover, 72 basic events were found to be of the primary causes provoking the occurrence of undesirable events. However, some experts often find it difficult to precisely determine the probabilities of occurrence of basic events of the tree. For the purpose of evaluating the occurrence of each basic event, we used the fuzzy logic. Hence, at the end of the study, we were able to develop a model that could help us evaluate the risks accompanied the fires and pipelines explosion as well as the consequences.

Keywords: *Bayesian networks, bow tie, fuzzy logic, fire and explosion of pipelines.*

ملخص

خطوط الأنابيب هي الوسيلة الرئيسية لنقل المحروقات انطلاقاً من الآبار ومجمعات التكبير وصولاً إلى مراكز التوزيع. تم الإبلاغ عن آلاف الحوادث على مستوى خطوط الأنابيب في العقدين الماضيين، ومعظمها تكون لها عواقب وخيمة. وقد أثار فشل الأخيرة اضطراباً وقلقاً بهذا الشأن في الجزائر. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تطوير نموذج احتمالي على أساس المخاطر المرتبطة بنقل المحروقات عبر خطوط الأنابيب. يطور البحث نموذجاً تنبئياً لاحتمال الفشل واشتعال النار والانفجار على مستوى الأنابيب، وكذا احتمالات نتائجها.

التحسين المستمر لإجراءات السلامة، وخاصة في مجال المحروقات، لا يزال مصدر قلق كبير منذ وقوع الحوادث حيث أنها تظل واحدة من الأسباب الرئيسية لتزايد عدد الضحايا، مثل الوفيات والإصابات وعمليات الإجلاء. لذلك، في العمل الحالي، نحن نحاول تسليط الضوء على سبل تطوير وسيلة لتقييم مخاطر حدوث اشتعال النار وانفجار على مستوى الأنابيب. الأسباب والنتائج المترتبة عليها يتم تحليلها باستخدام شجرة الفشل ونموذج ربطة العنق (الفراشة) من ناحية. من ناحية أخرى، يتم استخدام التحليل الكمي اعتماداً على شبكة بايز لتقدير احتمال وقوع الحدث غير المرغوب فيه. بالإضافة إلى ذلك، تم العثور على 72 حدثاً أولياً تعتبر كأسباب رئيسية لظهور الحادث. ومع ذلك، ففي كثير من الأحيان يجد الخبراء صعوبة في تحديد احتمالات الأحداث الأولية بدقة. من أجل تقييم احتمال ظهور كل حدث أولي، استخدمنا تقنيات المنطق الضبابي. وهكذا، في نهاية الدراسة، وضعنا نموذجاً يمكن أن يساعدنا في تقييم خطر اشتعال النار وانفجار الأنابيب وكذا عواقب هذه الأخطار.

كلمات البحث: شبكة بايز، ربطة العنق، المنطق الضبابي، اشتعال وانفجار خطوط الأنابيب.

Table des matières

REMERCIEMENT	I
RESUME.....	II
ABSTRACT	III
ملخص IV	
TABLE DES MATIERES	V
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
PRINCIPALES ABREVIATIONS.....	X
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES METHODES D'ANALYSE DES RISQUES..	5
I.1 Introduction	5
I.2 Analyse des risques : Notions de base.....	6
I.2.1 Analyse	6
I.2.2 Risque	6
I.2.3 Analyse des risques.....	8
I.2.4 Classification des risques	8
I.2.4.1 Risque négligeable	8
I.2.4.2 Risque acceptable	8
I.2.4.3 Risque indésirable	9
I.2.4.4 Risque inacceptable.....	9
I.3 Classification des approches d'analyse des risques.....	10
I.3.1 Approches qualitatives	11
I.3.2 Approches quantitatives.....	11
I.3.3 Méthode semi-quantitative.....	12
I.3.4 Approches de classement rapide	12
I.3.5 Approches axées sur les conséquences ou Approches déterministes	13
I.3.6 Approches probabilistes.....	13
I.4 Les analyses des risques	14

I.4.1	La liste de contrôle.....	14
I.4.2	Examen de la sécurité	14
I.4.3	What-If- Analysis.....	14
I.4.4	Hazard and Operability Analysis (HAZOP)	15
I.4.5	Analyse des Modes de Défaillances, et de leurs Effets (AMDE)	15
I.4.6	Identification systématique des points de rejet (SIRP)	16
I.4.7	Diagramme logique maître (MLD).....	18
I.4.8	Indice de fiabilité humaine (HRI)	18
I.4.9	L'arbre de défaillance (AdD).....	18
I.4.9.1	Introduction et définitions	18
I.4.9.2	Cohérence des arbres de défaillance	22
I.4.9.3	Symboles utilisés dans l'arbre de défaillance	27
I.4.10	L'arbre des événements	30
I.4.11	Nœud papillon.....	31
I.5	Conclusion.....	31

CHAPITRE II : L'APPROCHE BAYESIENNE ET SON ROLE DANS L'EVALUATION DES RISQUES..... 33

II.1	Introduction	33
II.2	Principes de base du raisonnement sous incertitude.....	34
II.2.1	Herbe humide.....	34
II.2.2	Expliquer loin.....	34
II.2.3	Dépendance des événements.....	35
II.2.4	Certitudes antérieures.....	35
II.3	Réseaux causaux	35
II.4	Calcul de probabilité	38
II.4.1	Calcul de probabilité de base	39
II.4.2	Probabilités subjectives.....	41
II.4.3	Indépendance conditionnelle	41
II.5	Réseaux bayésiens.....	42
II.5.1	La règle de la chaîne	44
II.5.2	Raisonnement évident.....	44
II.5.3	Les réseaux bayésiens et la fonctionnalité d'un cerveau humain.....	45
II.6	Applications des réseaux bayésiens.....	46
II.7	Etapas de modélisation d'un réseau bayésien	50
II.8	Conclusion	50

CHAPITRE III : LES RISQUES LIES AU TRANSPORT DU GAZ PAR CANALISATIONS..... 53

III.1	Introduction	53
III.2	Description du réseau de transport des hydrocarbures par canalisation	53
III.3	Présentation du complexe de liquéfaction du gaz naturel de Skikda	56
III.3.1	Description du complexe GL1K avant la construction du nouveau train	56

III.3.1.1 Procédé de liquéfaction	57
III.3.2 Description du nouveau train	58
III.3.2.1 Description du procédé.....	59
III.3.2.2 Conditionnement du gaz d'alimentation et système de compression	60
III.3.2.3 Enlèvement du gaz acide (décarbonatation).....	60
III.3.2.4 Séchage.....	60
III.3.2.5 Unité d'enlèvement de mercure	60
III.3.2.6 Liquéfaction du gaz naturel.....	61
III.3.2.7 Détenteurs.....	61
III.3.2.8 Extraction d'hélium.....	61
III.3.2.9 Fractionnement.....	61
III.3.2.10 Réinjection du GPL	62
III.3.2.11 Stockage du GNL, du gaz de transfert et des évaporats	62
III.3.2.12 Les utilités.....	63
III.3.2.13 Circuit du gaz combustible	64
III.3.2.14 Le système torche et brulot.....	64
III.4 Modèles d'aide à la décision axés sur les risques liés aux pipelines	64
III.5 Les sources de défaillance des pipelines	66
III.6 Evaluation de la probabilité de défaillance des pipelines	67
III.7 Conséquences de défaillance.....	74
III.8 Conclusion	81
CHAPITRE IV : APPLICATION : ETUDE DE CAS	84
IV.1 Introduction	84
IV.2 Méthodes	86
IV.2.1 Construction de l'arbre de défaillance pour le feu et l'explosion des pipelines	87
IV.2.2 La logique floue	89
IV.2.3 Le Réseau Bayésien et le nœud papillon	94
IV.3 Étude de cas.....	96
IV.3.1 Analyse de nœud papillon.....	96
IV.3.2 Résultats et discussion	101
IV.4 Conclusion.....	102
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	103
BIBLIOGRAPHIE	106
ANNEXES.....	119

Liste des figures

Figure I. 1 <i>Classification des risques</i>	10
Figure I. 2 <i>Logigramme de l'étude des déviations</i>	16
Figure I. 3 <i>Organigramme de la méthode AMDE</i>	17
Figure I. 4 <i>Exemple simple d'arbre de défaillance</i>	23
Figure I. 5 <i>Arbre d'événement « tuyau de gaz arraché »</i>	30
Figure II. 1 <i>Un modèle graphique pour l'herbe humide</i>	36
Figure II. 2 <i>Connexions en série, divergentes et convergentes respectivement</i>	37
Figure II. 3 <i>Un graphe acyclique dirigé</i>	43
Figure III. 1 <i>Composants du réseau de pipelines</i>	55
Figure IV. 1 <i>L'arbre de défaillance pour le FEP</i>	90
Figure IV. 2 <i>Echelle floue des possibilités des évènements basiques</i>	92
Figure IV. 3 <i>Exemple d'un modèle NP</i>	95
Figure IV. 4 <i>Cartographie de BT en BN</i>	95
Figure IV. 5 <i>Modèle de NP pour le scénario du FEP</i>	97
Figure IV. 6 <i>RB conforme à NP (figure IV.5)</i>	100
Figure IV. 7 <i>TPC du FEP</i>	100
Figure IV. 8 <i>Poc du FEP, N2 et N3</i>	101
Figure IV. 9 <i>Poc des conséquences de FEP</i>	101

Liste des tableaux

Tableau I. 1 <i>Matrice de criticité (G/O)</i>	8
Tableau I. 2 <i>Les avantages et les inconvénients des méthodes quantitatives et qualitatives</i>	12
Tableau I. 3 <i>La table de vérité booléenne</i>	24
Tableau I. 4 <i>Symboles utilisés dans l'arbre de défaillance</i>	27
Tableau III. 1 <i>Types de défaillance dans six sources différentes</i>	67
Tableau III. 2 <i>Échelle d'évaluation des probabilités (Infraguide 2006)</i>	68
Tableau III. 3 <i>Échelle d'évaluation des probabilités de défaillance (DNV 2010)</i>	68
Tableau III. 4 <i>Résumé des variables affectant la probabilité de défaillance de la corrosion</i>	75
Tableau III. 5 <i>Résumé des variables affectant la probabilité de défaillances opérationnelles</i>	76
Tableau III. 6 <i>Résumé des variables affectant la probabilité de défaillances externes</i>	77
Tableau III. 7 <i>Échelle des conséquences pour la sécurité (DNV 2010)</i>	77
Tableau III. 8 <i>Échelle des conséquences environnementales (DNV 2010)</i>	78
Tableau III. 9 <i>Échelle des conséquences économiques (DNV 2010)</i>	78
Tableau IV. 1 <i>Tous les événements de l'arbre de défaillance</i>	87
Tableau IV. 2 <i>Description des conséquences de FEP</i>	97
Tableau IV. 3 <i>Jugements d'experts et valeurs de probabilité pour tous les EB</i>	98

Principales abréviations

RB : Réseau bayésien

AdD : Arbre de défaillance

AdE : Arbre des évènements

NP : Nœud papillon

HMSO : Her Majesty's Stationery Office

GT : Groupe de travail

OHSAS : Occupational Health and Safety Assessment Series

ISO : International Organization for Standardization

HSE : Hygiène, sécurité, environnement

AQS-GT OORS : Association Qualité-Sécurité – Groupe de travail Observatoire de l'Opinion sur les Risques de la Sécurité

PRAM : Project risk analysis and management

PMBOK : Project management body of knowledge

HAZOP : Hazard and operability study

AMDE : Analyse des modes de défaillance et de leur effet

AMDEC : Analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité

SIRP : Systematic identification of release points

MLD : Master Logic Diagram

HRI : Human Reliability Index

ECM : Ensemble de coupe minimale

DFT : Dynamic fault tree

TFT : Temporal fault tree

NASA : National aeronautics and space administration

SONATRACH : Société nationale de transport par canalisation des hydrocarbures

GPL : Gaz pétrolier liquéfié

GNL : Gaz naturel liquéfié

STC : Systèmes de transport par canalisations

MTEP : Million de tonnes équivalent pétrole

CDHL : Centre dispatching des hydrocarbures liquides

CNDG : Centre national de dispatching gaz

SONELGAZ : Société nationale de l'électricité et du gaz

AHP : Analytic hierarchy process

EGIG : European Gas pipeline Incident data Group

DNV : Det Norske Veritas

DSS : Decision support system

ANP : Analytical network process

SCADA : Supervisory control and data acquisition

OPS : Office of pipeline safety

DOT : Department of transportation

HCA : High consequence area

APCI : Air product and chemicals incorporation

MR : Mixed refrigerant

FEP : Feu et explosion des pipelines

EB : Evènements basiques

ES : Evènement supérieur

EI : Evènements intermédiaires

TPC : Tables de probabilités conditionnelles

Poc : Probabilité d'occurrence

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les installations de gaz sont des usines à haut risque. Elles transportent, traitent et stockent des grandes volumes de produits liquides et gazeux qui sont inflammables, explosifs et toxiques. L'apparition des accidents majeurs récents dans l'industrie gazière algérienne, comme la grande explosion du complexe GL1/K à Skikda en janvier 2004, ainsi que le terminal de Skikda en octobre 2004, par ailleurs, la récente explosion de l'unité de remplissage au gaz butane de la Sonatrach à Skikda, en janvier 2016, est considérée comme une preuve concluante le grand risque de ces installations, car les accidents étaient, et encore l'une des principales raisons du nombre croissant de blessures et de décès, avec la libération de gaz naturel liquéfié peut conduire à de nombreux dangers, où une fuite en présence de la source d'ignition peuvent causé un incendie ou une explosion dans un environnement dangereux évolutif.

Les pipelines sont les principaux moyens de transport des hydrocarbures, des puits de forage et complexes de raffinage vers les centres de distribution. Des milliers d'accidents ont été signalés sur des pipelines au cours des deux dernières décennies, dont la plupart ont eu des conséquences considérables. Les accidents récents ont soulevés des inquiétudes sur les risques associées à ces pipelines en Algérie. Le vieillissement des réseaux et le nombre considérable de défaillances des pipelines, ainsi que les conséquences importantes de leurs défaillances, ont incité de nombreux chercheurs à étudier la défaillance des pipelines. Une étude approfondie de ces efforts de recherche a révélé l'absence d'un modèle objectif complet d'évaluation des défaillances et des risques liés aux pipelines. La majorité des études ont porté sur la corrosion ou les défaillances de tierces parties et n'ont pas pu évaluer la probabilité d'autres sources de défaillance. La plupart des études qui considèrent plusieurs ou même toutes les sources de défaillance sont subjectives ou elles développent des modèles physiques qui sont très coûteux à mettre en œuvre.

Les modèles subjectifs sont généralement qualitatifs et s'appuient sur l'opinion d'experts qui est difficile, voire impossible à obtenir en raison de l'emplacement de la plupart des pipelines, qui sont enterrés. D'ailleurs, à part les dépenses qui peuvent être imposées aux exploitants, la pénurie de données d'inspection sur les pipelines non nettoyés et dans les premiers stades de l'exploitation des pipelines a été une limitation. Les modèles de planification de maintenance existants n'utilisent pas de modèles de défaillance ou d'évaluation des risques pour planifier les cycles de vie des pipelines ou ils ne sont pas structurés.

Pour maintenir la compétitivité et la capacité de survie sur le marché, les entreprises doivent adopter la meilleure et la plus efficace approche pour évaluer l'intégrité de leurs actifs de façon opportune et structurée en utilisant les meilleurs outils disponibles. Les entreprises doivent s'efforcer de maintenir une performance optimale de leurs actifs et minimiser les conséquences de leurs défaillances. Parmi les infrastructures industrielles les plus importantes figurent les systèmes de transport des hydrocarbures. Les conditions de ces systèmes doivent faire l'objet d'un suivi régulier afin de garantir leur intégrité et de préserver l'environnement.

Les événements de défaillance des pipelines consistent en une fuite ou une rupture du tuyau ; Les modes de défaillance sont les mécanismes de dégradation, c'est-à-dire la corrosion, les fissures ou d'autres défauts. L'incertitude dans les données d'inspection collectées, la géométrie du pipeline, les propriétés du matériau du pipeline et les caractéristiques de fonctionnement présentent un grand défi à l'analyse. Une approche d'évaluation fondée sur les probabilités devrait être adoptée car elle est la mieux adaptée pour faire face à l'incertitude, où une valeur quantifiable de la probabilité de défaillance peut être estimée. Des méthodes probabilistes peuvent être utilisées pour évaluer la fiabilité actuelle et future des pipelines à soutenir la demande opérationnelle sans compromettre la sécurité et la fiabilité. En fonction du résultat de l'évaluation, on peut déterminer l'aptitude au service des pipelines ainsi que la durée de vie restante.

L'analyse des risques se concentre sur la quantification de la probabilité d'occurrence des scénarios d'accidents sélectionnés. Il existe de nombreuses techniques disponibles, parmi lesquelles : le réseau bayésien (RB), l'arbre de défaillance (AdD), l'arbre d'événements (AdE), le nœud papillon (NP), qui sont très populaires. Bien que les méthodes classiques d'évaluation des risques aient joué un rôle important dans l'identification des risques majeurs et le maintien de la sécurité dans les installations de raffinage, elles souffrent de limitations bordant leur application dans l'analyse des risques des systèmes complexes et interconnectés.

La quantification du risque de feu et explosion des pipelines est une tâche très difficile, car les systèmes de distribution des hydrocarbures comprennent de nombreux (sinon des milliers) de kilomètres de tuyaux de différents âges et de matériaux différents avec des conditions environnementales et opérationnelles qui varient spatialement et temporellement.

Dans ce contexte, cette étude vise à élaborer un modèle quantitatif basé sur l'évaluation de la probabilité de défaillance des pipelines par la combinaison de nœud papillon et la logique floue avec les réseaux bayésiens, modèle qui peut également être utilisé pour planifier des solutions de maintenance. Le résultat de cette recherche aidera les exploitants de pipelines de

pétrole et de gaz dans leur processus de prise de décision pour les plans d'inspection et d'entretien.

L'objectif principal de cette recherche est d'élaborer un modèle prédictif axé sur les risques liés au transport des hydrocarbures par pipelines pendant la phase d'exploitation. Cet objectif peut être décomposé en les sous-objectifs suivants :

1. Identifier et étudier les sources de défaillance et leurs effets sur les pipelines ;
2. Prévoir la probabilité de défaillance de ces pipelines ;
3. Développer les conséquences probables des défaillances ;
4. Élaborer un modèle bayésien intégré d'évaluation des risques ;

Cette thèse est composée de quatre chapitres, résumés comme suit :

Chapitre I : Nous aborderons dans ce chapitre et dans le cadre de notre étude, les différents concepts et les différents types d'analyse des risques des systèmes en vue d'améliorer leurs fiabilités et leurs sécurités.

Chapitre II : Ce chapitre sera consacré à une présentation des réseaux bayésiens, leurs principes, les calculs et méthodes d'inférence et d'apprentissage de leurs structures et paramètres.

Chapitre III : Est consacré à la description du complexe de liquéfaction du gaz naturel GL1/K de Skikda, et examine les travaux précédents sur l'évaluation des risques et des défaillances des pipelines. Les résultats de l'examen de la littérature sont organisés et les lacunes de ces recherches sont identifiées. Par conséquent, les techniques les plus appropriées pour ces recherches sont étudiées.

Chapitre IV : Ce chapitre considéré comme une étude de cas. L'application de la méthode proposée porte sur l'analyse des risques liés aux pipelines situés au complexe GL1/K de Skikda. Nous essayons dans cette étude de concentrer la lumière sur les façons de développer une méthode pour l'évaluation des risques de feu et d'explosion des pipelines. Les causes de ces dernières et leurs conséquences sont, d'une part, analysées au moyen des méthodes d'arbre de défaillance et de nœud papillon. D'autre part, une analyse quantitative mettant en œuvre les réseaux bayésiens est utilisée pour estimer la probabilité de survenue de l'événement indésirable.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur les méthodes d'analyse des risques

CHAPITRE I: Etat de l'art sur les analyses des risques

Chapitre I : Etat de l'art sur les méthodes d'analyse des risques

I.1 Introduction

L'évaluation des risques peut constituer l'étape la plus importante du processus de gestion des risques, mais aussi la plus difficile et la plus susceptible d'erreurs. L'évaluation des risques dans sa définition générale est une procédure structurée qui évalue qualitativement et / ou quantitativement le niveau de risque imposé par les sources de danger identifiées dans l'installation.

L'évaluation des risques liés aux domaines industriels dans leurs installations dangereuses fait partie intégrante de la gestion de la sécurité industrielle. En d'autres termes, l'évaluation des risques est une procédure systématique pour décrire et quantifier le risque associé aux substances, processus, actions ou événements dangereux. Les principaux objectifs de l'évaluation des risques dans les installations industrielles dangereuses consistent à fournir des informations sur la sécurité industrielle, les points les plus dangereux en termes de sécurité et des recommandations raisonnables pour réduire le risque.

Le processus d'évaluation des risques comprend les phases principales suivantes :

Identification des dangers : L'emplacement, l'identification et la caractérisation de la source potentielle et de l'emplacement de l'accident dans la juridiction ou la localité concernée dans le processus est désignée comme l'identification des dangers. Cette étape se conclut essentiellement par l'identification et / ou la postulation de scénarios d'accidents nécessitant un examen et une analyse plus poussés.

Analyse de probabilité : L'évaluation de la probabilité d'un accident individuel dans un processus est appelée analyse de probabilité. Cette étape permet d'examiner et / ou de hiérarchiser le scénario d'accident potentiel en fonction de leur occurrence.

Analyse des conséquences : L'évaluation des conséquences et de l'impact associés à l'occurrence de scénarios d'accidents postulés dans un processus est appelée analyse des conséquences. Cette étape indique la compréhension de la nature des résultats d'un accident et permet surtout d'examiner et / ou de hiérarchiser le scénario d'accident en fonction de son impact potentiel sur l'être humain et les biens.

Analyse des risques : Combinaison des résultats des efforts d'analyse des probabilités d'accident et des conséquences pour fournir une mesure du risque global associé à l'activité ou aux activités spécifiques étudiées dans le cadre d'un processus appelé analyse de risque. Cette étape permet de mettre l'accent sur la priorisation du scénario d'accident en termes de «risque» global.

La portée de l'évaluation des risques et de toutes les méthodes qui ont été élaborées à cet effet est reconnue comme suit : pour améliorer la sécurité des installations dangereuses et réduire au minimum le risque imposé à la population environnante. Ces méthodes diffèrent dans les résultats fournis, quantitativement et / ou qualitativement, mais elles ont tous la même portée. Alors, l'utilisation de l'évaluation des risques est de fournir la contribution nécessaire à une variété de décisions.

I.2 Analyse des risques : Notions de base

I.2.1 Analyse

Etude faite en vue de discerner les différentes parties d'un tout, de déterminer ou d'expliquer les rapports qu'elles entretiennent les unes avec les autres [LAROUSSE 1999] [1].

I.2.2 Risque

Le terme «risque» est relativement récent. Linguistiquement il est dérivé du mot français «risqué». Le terme «risque» n'est pas connue avant le milieu du 17^{ème} siècle, [Flanagan et Norman 1993] [2].

Selon [Larousse, 2006] [3] : Le risque est une éventualité d'un préjudice, d'un événement malheureux.

Selon [Larousse, 2005] [4] : Le risque est une possibilité, probabilité d'un fait, d'un événement considéré comme mal ou un dommage. Ou :

Danger, inconvénient plus au moins probable auquel on est exposé : courir le risque.

Selon [HMSO, 1995] [5] : Le risque est une combinaison de la probabilité, de la fréquence, de l'occurrence d'un aléa défini et de l'amplitude des conséquences de cette occurrence.

Selon [GT Aspects sémantiques du risque, 1997] [6] : Le risque est une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et/ou la mesure associée à ses effets et conséquences.

Selon [GT Méthodologie, 2003] [7] : Le risque est considéré comme la possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une exposition aux effets d'un phénomène dangereux. C'est une espérance mathématique de pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens et atteinte à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée, pour un aléa particulier. Le risque est le produit de l'aléa par la vulnérabilité.

Selon [L'OHSAS 18001, 2005] [8] : Le risque est une combinaison de la probabilité et de la (les) conséquence(s) de la survenue d'un événement dangereux spécifié.

Selon [NF EN 61508, Décembre 1998] [9] : Le risque est une combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et de sa gravité.

Selon [ISO 14971, 2007] [10] : Le risque est une combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité.

Selon [ISO/CEI Guide 73, 2002] [11] : Le risque est une combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences.

Selon [NF EN 50129, Mai 2003] [12] : Le risque est une combinaison de la fréquence ou de la probabilité, et des conséquences d'un événement redouté.

Selon [NF EN 50126, Janvier 2000] [13] : Le risque c'est la combinaison de deux éléments :

La probabilité d'occurrence d'un événement ou d'une combinaison d'événements conduisant à une situation dangereuse, ou la fréquence de tels événements, et les conséquences de cette situation dangereuse.

Selon [Directive 96/82/EC (SEVESO II), 9 décembre 1996] [14] : Le risque est une probabilité qu'un effet spécifique se produise dans une période donnée ou dans des circonstances déterminées.

I.2.3 Analyse des risques

L'analyse des risques consiste à les identifier et à comprendre les mécanismes conduisant à leur concrétisation dans le but de réduire leur probabilité d'occurrence et / ou leur gravité. Cette étude doit aboutir à la mise en place de mesures permettant de réduire leur apparition ou leurs conséquences sur l'homme au travail, les matériels de production, les produits, les populations extérieures à notre domaine d'étude ainsi que les écosystèmes pour tendre le plus possible à une maîtrise des risques. [Périlhon 1998] [15].

I.2.4 Classification des risques

Couramment, les niveaux de gravité et la probabilité d'occurrence d'un accident sont croisés dans une matrice de criticité pour positionner les zones de risque. La matrice Gravité/Occurrence ci-dessous (Tableau I.1) est proposée par la norme NF EN 50126 [13] :

Tableau I. 1 Matrice de criticité (G/O)

		Niveaux de gravité			
		Insignifiant	Marginal	Critique	Catastrophique
Probabilité d'occurrence	Invraisemblable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
	Improbable	Négligeable	Négligeable	Acceptable	Acceptable
	Rare	Négligeable	Acceptable	Indésirable	Indésirable
	Occasionnel	Acceptable	Indésirable	Indésirable	Inacceptable
	Probable	Acceptable	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable
	Fréquent	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable

I.2.4.1 Risque négligeable

D'après [GT Aspects sémantiques du risque, 1997] [6] : Un risque est négligeable s'il est inférieur à un seuil (par exemple : 10⁻⁹ par an). Ou,

Risque dont on ne se soucie pas de l'occurrence au quotidien.

D'après [HSE, 1992] [16] : Le risque négligeable fait référence à un niveau de risque dont l'occurrence est de l'ordre de 1 par million et par année et au-dessous, et dont la possibilité de réalisation n'affecte pas la vie courante.

I.2.4.2 Risque acceptable

D'après [Laurant, 2003] [17] : Traduit la notion relative à un risque intégré tel que dans le contexte de la vie courante.

D'après [AQS-GT OORS, Mars 1996] [18] : Risque acceptable pour les personnes : un risque n'est accepté que s'il y a contrepartie ou/et s'il est inférieur au risque déjà encouru.

Risque acceptable pour les entreprises : le risque acceptable ne se conçoit que dans le cadre résiduel, après la mise en œuvre des mesures de prévention et de Protection notamment celles imposées par la législation et la réglementation en vigueur.

D'après [GT 7 - CEI] [19] : Risque acceptable : valeur d'un risque résultant d'une décision explicite établie de façon objective. Il est parfois préférable pour certaines branches d'activité de parler du risque admissible ou du risque limite.

D'après [GT Aspects sémantiques du risque, 1997] [6] : Un risque est acceptable en référence à un objectif de sécurité donné.

Un risque est acceptable s'il est inférieur à un seuil (par exemple : 10^{-5} par an).

Risque avec lequel on consent à vivre en contrepartie d'un bénéfice et dans la mesure où il est contrôlé.

D'après [ISO/CEI Guide 51, 1999] [20] : Un risque accepté dans un contexte donné basé sur des valeurs courantes de notre société.

D'après [ISO/CEI Guide 73, 2002] [11] : L'acceptation du risque dépend des critères de risques retenus par la personne qui prend la décision.

I.2.4.3 Risque indésirable

D'après [NF EN 61508, Décembre 1998] [9] : Risque indésirable, tolérable uniquement s'il est impossible de réduire le risque ou si le coût de la réduction est disproportionné par rapport à l'amélioration possible.

I.2.4.4 Risque inacceptable

Risque inacceptable est lorsque le plan d'atténuation des risques ne suffit pas à éviter. Dans ce cas, l'organisation doit mettre en œuvre le plan de prévention pour prévenir les risques.

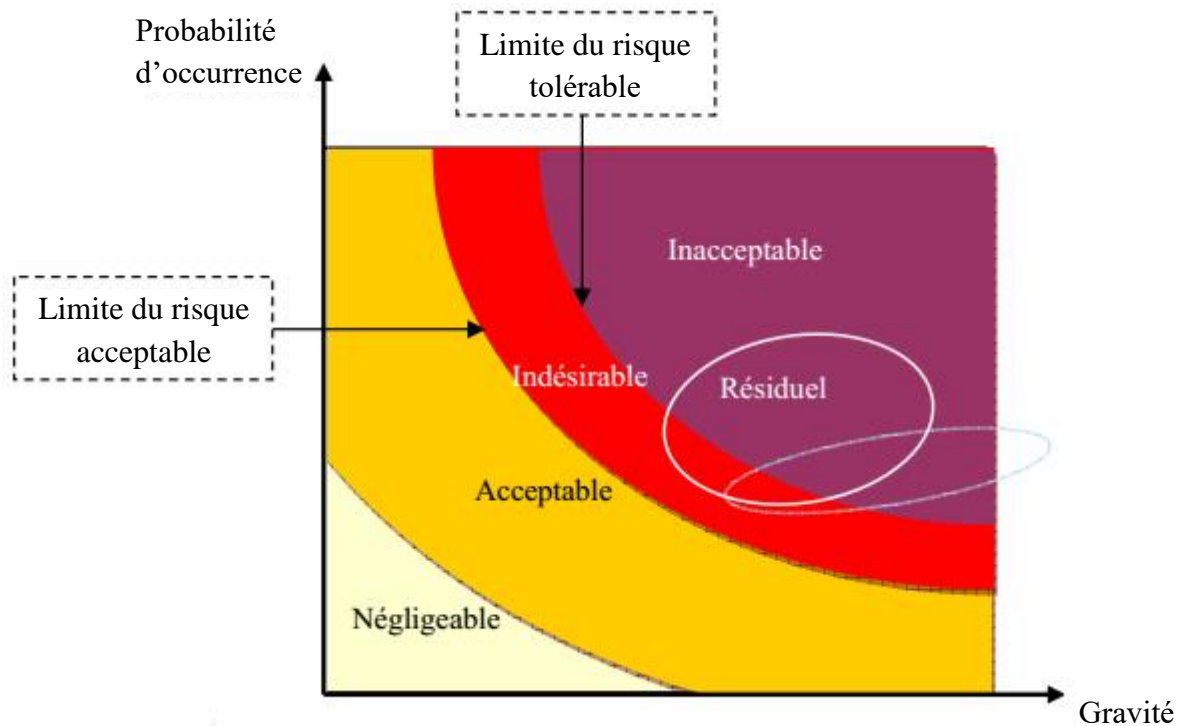


Figure I. 1 Classification des risques

I.3 Classification des approches d'analyse des risques

L'évaluation des risques est un sujet que les chercheurs ont souligné récemment. La définition trouvée dans l'ISO 31000: (2009) [21] est que l'évaluation des risques comprend leur identification, leur analyse et leur estimation. L'identification des risques est l'étape où l'organisation doit identifier les sources de risque, les zones d'impacts, les événements et leurs causes et les conséquences potentielles respectives. Il est clairement souligné par Forsberg et al (2005) [22] que l'analyse des risques n'est pas synonyme d'une évaluation des risques techniques mais plutôt un plan de gestion de ces risques. L'analyse de risque est la procédure de son aperçu ascendant. Le but de l'évaluation du risque est d'appuyer les prises de décision, axées sur les résultats de leur analyse, sur les risques qui nécessitent une attention de la part de la direction et d'établir un ordre de priorité pour la mise en œuvre du traitement. Le PRAM (Analyse et gestion des risques du projet) fourni par Chapman (2001) [23] est divisé en deux sous-étapes : une sous-étape d'analyse qualitative centrée sur l'identification conjointement avec l'évaluation des risques tandis que la sous-étape de l'analyse quantitative se concentre sur l'évaluation du risque. De plus, le Guide PMBOK (PMI, 2004) [24] distingue clairement l'analyse qualitative des risques et l'analyse quantitative des risques au chapitre 11.

I.3.1 Approches qualitatives

Bien que la section 11.3 du Guide du PMBOK [24] définisse cette analyse qualitative comme la priorité des risques, Thompson et Perry (1992) [25] définissent l'analyse qualitative du risque comme Le processus de deux objectifs : l'identification des risques et leur évaluation initiale. Cette phase initiale est essentielle car elle apporte des avantages de compréhension. Heldman (2005) [26] dit que le but du processus d'analyse qualitative des risques consiste à déterminer les conséquences que les risques identifiés peuvent avoir sur les objectifs du projet. Il s'agit de déterminer la probabilité d'occurrence des risques qui se produisent et les risques soient classés en fonction de leurs effets sur les objectifs du projet. À son avis, l'analyse qualitative des risques est la méthode la plus courante et sans doute la plus facile pour l'analyse des risques. En ce sens, Chapman et Ward (1997) [27] ajoutent que l'analyse qualitative et sa documentation peuvent également aider à saisir les connaissances de l'entreprise d'une manière efficace, et à utiliser dans les projets actuels et futurs où une gestion explicite de la culture d'entreprise peut payer des dividendes importants. Restrepo (1995) [28] a déclaré que « la majorité des décisions sont fondées sur les résultats de l'évaluation qualitative des risques que sur les résultats quantitatifs », ainsi Patterson (2002) [29] Explique que les évaluations qualitatives sont généralement plus faciles et moins coûteuses par rapport les techniques de simulation quantitative. Néanmoins, par conséquent, les évaluations qualitatives peuvent contenir davantage d'incertitudes et des informations potentiellement moins précises que les méthodes d'analyse quantitative.

I.3.2 Approches quantitatives

L'analyse quantitative des risques est définie comme le processus d'évaluation et de quantification de l'exposition au risque en attribuant des valeurs numériques aux probabilités et aux impacts du risque, comme l'illustre Heldman (2005) [26]. Cependant, certaines des techniques de quantification sont étroitement liées aux techniques qualitatives car elles requièrent la note globale qui doit être obtenue par l'application des échelles de probabilité et d'impact. La section 11.4 du Guide du PMBOK [24] définit l'analyse quantitative du risque comme l'analyse numérique de l'effet du risque sur le projet. Pour Thompson et Perry (1992) [25], l'analyse quantitative comprend fréquemment des méthodes d'analyse complexes, qui nécessitent régulièrement des programmes informatiques comme une grande caractéristique formelle de l'ensemble du processus exigeant des estimations d'incertitude et une combinaison probabiliste d'incertitudes individuelles. Cooper et al (2005) [30] ont reconnu que l'analyse quantitative utilise des échelles de rapport numérique pour les vraisemblances et les

conséquences plutôt que des échelles descriptives. La valeur de l'analyse quantitative est de faciliter la distinction entre les objectifs, les attentes et les engagements. La poursuite des risques est un moyen efficace pour l'exécution d'un projet, et les changements culturels connexes selon Chapman et Ward (1997) [27].

Tableau I. 2 Les avantages et les inconvénients des méthodes quantitatives et qualitatives

	Les méthodes quantitatives	Les méthodes qualitatives
Les avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Elles permettent de définir des conséquences des incidents survenus de manière quantitative, ce qui facilite la maîtrise des coûts et des avantages lors de la sélection des protections. - Elles donnent une image plus précise du risque. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elles permettent de mettre en ordre les risques en fonction des priorités. - Elles permettent de déterminer des zones de plus grand risque dans une courte période et sans grandes dépenses. - L'analyse est relativement facile et pas coûteuse.
Les inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Les résultats de l'analyse ne sont pas toujours exacts et peuvent être si confus. - Méthodes habituelles doivent être enrichies par une description qualitative (sous la forme de commentaires, interprétation). - Analyse réalisée avec l'application de ces méthodes est généralement plus coûteuse, exigeant une plus grande expérience et des outils avancés. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elles ne permettent pas la détermination des probabilités et des résultats à l'aide de mesures numériques. - l'analyse coûts/bénéfices est plus difficile lors de la sélection des protections. - Résultats obtenus ont un caractère général, approximative, etc.

I.3.3 Méthode semi-quantitative

En plus des méthodes mentionnées ci-dessus, une approche semi-quantitative peut être adoptée pour l'évaluation des risques industriels. Bandyopadhyay (2005) [31] dit que : La méthode semi-quantitative est quantitative et partiellement qualitative. Le zonage des dangers est effectué selon une approche quantitative, mais l'évaluation des risques est effectuée selon une approche qualitative.

Ainsi, $\text{Risque} = \text{Probabilité} * \text{Vulnérabilité} (\text{Conséquences} / \text{Effets} + \text{Éléments à Risque})$.

I.3.4 Approches de classement rapide

En général, les méthodes de classement rapide incluent divers indices de danger et de risque. Ces méthodes utilisent un certain nombre de facteurs empiriques, qui sont combinés pour

fournir une mesure du risque potentiel. Les indices sont largement utilisés pour le classement des différentes unités d'une industrie des procédés chimiques en fonction des risques qu'ils présentent (accidents d'incendies, d'explosions et / ou de rejet toxique). Ce type de classement permet aux professionnels d'identifier les unités les plus dangereuses et moins dangereuses. Les méthodes de classement rapide utilisent un certain nombre de facteurs empiriques ; en fonction de la fréquence de l'accident ; qui sont combinés pour fournir une mesure du risque potentiel. Smeder, Christou et al. (1996) [32].

I.3.5 Approches axées sur les conséquences ou Approches déterministes

L'approche «axée sur les conséquences» est basée sur l'évaluation des conséquences des accidents imaginables, alors qu'aucune tentative n'est faite pour quantifier la probabilité de ces accidents (Smeder, Christou et al. 1996) [32]. Le concept de cette approche est d'éviter les incertitudes liées à la quantification des fréquences d'occurrence des accidents potentiels.

Étant donné que l'évaluation des fréquences d'occurrence des différents accidents est une tâche très difficile et demande beaucoup de temps, de nombreuses critiques ont été exprimées quant à l'utilité des fréquences évaluées compte tenu de l'incertitude associée aux estimations finales.

I.3.6 Approches probabilistes

L'évaluation probabiliste des risques est une méthodologie systématique et complète pour évaluer les risques associés à une entité technologique complexe. L'approche a défini le risque comme un résultat préjudiciable réalisable d'une activité ou d'une action. Dans une approche probabiliste, le risque est caractérisé par deux grandeurs: la gravité de la (les) conséquence (s) négative (s) possible (s) et la probabilité d'occurrence de chaque conséquence.

Les conséquences sont exprimées numériquement (par exemple, le nombre de personnes potentiellement blessées ou tuées ou évacuées...) et leurs probabilités d'occurrence sont exprimées sous la forme de probabilités ou de fréquences (c'est-à-dire le nombre d'occurrences ou la probabilité d'occurrence par unité de temps). Le risque total est la somme des produits des conséquences multipliés par leurs probabilités.

Il existe plusieurs méthodes quantitatives dans cette catégorie. Peu d'entre eux sont décrits comme : l'analyse probabiliste des risques, analyse probabiliste de la sécurité, évaluation quantitative des risques, analyse quantitative des scénarios, analyse des effets de mode de

défaillance et de criticité, analyse des arbres d'événements, analyse des arbres de défaillance et analyse des conséquences de la cause.

Le but principal de ce processus n'est pas seulement d'évaluer la gravité des accidents potentiels, mais aussi d'estimer la probabilité de leur occurrence. En général, ces méthodes utilisent des outils plus sophistiqués et en quelque sorte ils semblent plus complets dans l'analyse du risque que toutes les autres méthodes. Ces méthodes sont plus compliquées, plus longues et plus coûteuses.

I.4 Les analyses des risques

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation des risques industriels élaborées par différents groupes de scientifiques ou par différentes institutions ayant des cultures différentes en matière de gestion des risques et ayant une expérience différente.

I.4.1 La liste de contrôle

Les listes de contrôle sont peut-être la technique la plus ancienne et la plus intuitive. Grâce à l'utilisation de la liste de contrôle, un analyste peut facilement identifier les sources possibles du danger. Ils contiennent habituellement un grand nombre d'événements et de séquences d'événements (identifiés par l'analyste lui-même) qui peuvent conduire à un accident. Le succès de cette technique dépend principalement de l'expérience des développeurs et des utilisateurs.

I.4.2 Examen de la sécurité

Il s'agit généralement d'une équipe d'experts (qui sont sélectionnés en fonction de leur niveau d'expertise spécifique) pour identifier les conditions de l'usine ou les procédures d'exploitation qui pourraient conduire à un accident et entraîner des dommages importants à la propriété ou des impacts environnementaux. Le Département Américain de l'Energie a utilisé ces examens pour évaluer la sécurité des installations qui effectuent des opérations similaires avec des matériaux similaires.

I.4.3 What-If- Analysis

Comme son nom l'indique, il implique un ensemble de questions. Chaque question devient une ligne dans la table des analyses de scénarios Shickin (2004) [33]. Les colonnes du tableau contiennent la question «Quoi faire», «Conséquence / Risque», «Recommandation»,

«Responsable individuel» et une dernière colonne indiquant que la personne responsable a «Initiale et Date» au moment où la recommandation a été traitée et résolue.

I.4.4 Hazard and Operability Analysis (HAZOP)

HAZOP est une méthodologie structurée simple (Figure I.1) pour l'identification et l'évaluation des risques. Smeder, Christou et al. (1996) [32]. L'équipe devra faire alors une étude sur les déviations conduisant à des risques éventuels pour la sécurité. Elle évalue les conséquences à travers l'écart des variables de processus et un certain nombre de questions bien définies pour vérifier l'adéquation des mesures de sécurité existantes ou la nécessité des mesures complémentaires.

Limitation : Contrairement à l'analyse de la liste de contrôle, le succès de cette méthode dépend non seulement de l'expérience de l'utilisateur mais aussi de la familiarité de l'utilisateur avec l'installation étudiée.

I.4.5 Analyse des Modes de Défaillances, et de leurs Effets (AMDE)

Avec HAZOP, l'AMDE est la technique qualitative la plus couramment utilisée. (Figure I.3) L'AMDE a été historiquement utilisé beaucoup dans l'industrie électronique. Shickin (2004) [33]. Comme l'analyse What-If, les résultats de cette technique sont normalement résumés sous forme de tableau. Les éléments coloniaux communs du tableau sont le «Composant», la «Description» du moment où ils sont utilisés ou invoqués, le «Mode de défaillance», les «Garanties» et les «Actions».

L'objectif principal de cette méthode est d'identifier le point de défaillance unique. Dans cette procédure, les modes de défaillance possibles de chaque composant sont identifiés, ainsi que leurs causes et conséquences afin de détecter les défaillances possibles et aussi les modifications de conception pour réduire les risques indésirables. Depuis ce temps, l'AMDE examine la sécurité des usines, il est très précieux dans la phase de conception de l'installation. Cette analyse peut être étendue pour former une analyse quantitative des effets du mode de défaillance et de la criticité (AMDEC).

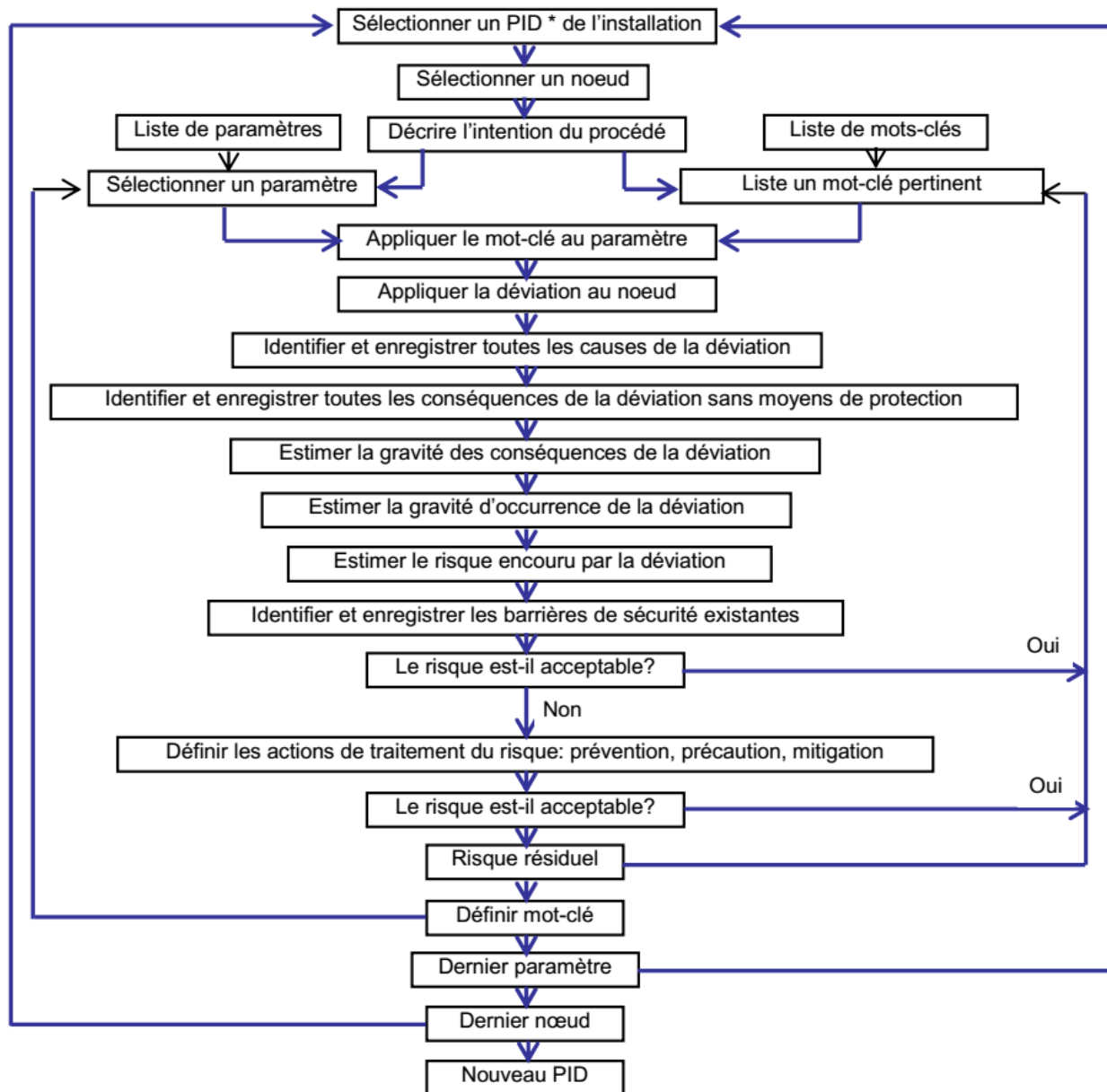


Figure I. 2 Logigramme de l'étude des déviations

(*) PID: Piping and Instrumentation Diagram.

I.4.6 Identification systématique des points de rejet (SIRP)

SIRP (Systematic Identification of Release Points) est une technique simple visant à identifier l'ensemble des ruptures concevables des composants, des tuyaux et des récipients de l'installation à partir desquels un rejet de substances inflammables ou toxiques peut se produire (Smeder, Christou et al., 1996) [32].

En général, pour chaque composant tuyau ou récipient, un certain nombre de ruptures à des tailles de trou caractéristiques, obtenues à partir de l'analyse statistique des données de défaillance historiques, sont examinées. Pour chaque point de libération identifié, la quantité de

matière libérée est estimée selon les conditions du procédé. Ensuite, on procède à un criblage des points de libération identifiés en fonction du taux de libération estimé.

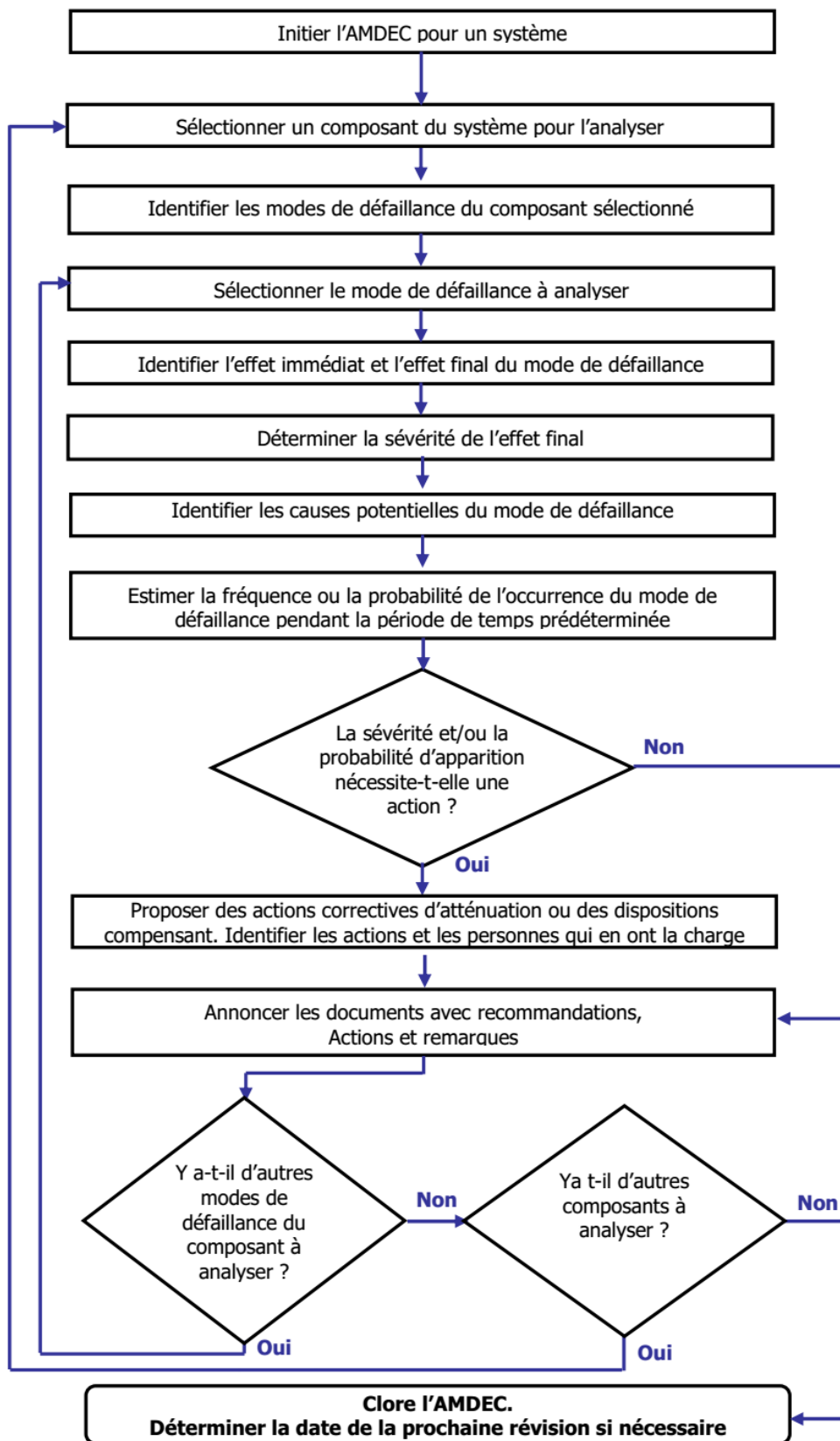


Figure I. 3 Organigramme de la méthode AMDE

I.4.7 Diagramme logique maître (MLD)

MLD est une technique déductive pour l'identification des risques potentiels (Smeder, Christou et al. 1996) [32]. Il part de l'événement indésirable et finalement identifie les séquences d'événements qui conduisent à un accident. Cette technique provient du champ nucléaire, mais plus tard son application dans le domaine chimique a également été identifiée.

I.4.8 Indice de fiabilité humaine (HRI)

Il s'agit d'une autre technique systématique d'identification et d'évaluation des facteurs qui influent sur la performance humaine durant les opérations normales et d'urgence (Shickin 2004) [33]. Ces facteurs comprennent: les conditions environnementales, les compétences humaines, la capacité psychophysique et la performance du système de représentation de l'information. Le but de cette méthode est d'identifier les erreurs humaines potentielles afin d'élaborer des recommandations pour réduire les risques indésirables. Cette technique est généralement réalisée en conjonction avec d'autres techniques d'évaluation des risques.

I.4.9 L'arbre de défaillance (AdD)

I.4.9.1 Introduction et définitions

L'analyse par l'arbre de défaillance a été conçue pour la première fois en 1961. Il a été inventé par H.A. Watson (Bell Laboratories), avec l'aide de M. A. Mearns, pour aider à la conception d'un nouveau système d'arme des forces aériennes américaines. David Haasl, de Boeing, a utilisé la nouvelle technique pour analyser l'ensemble du système. Il a été couronné de succès et, lors de la première Conférence sur la sécurité des systèmes en 1965, plusieurs documents sur l'AdD ont été présentés (Ericson, 1999) [34].

L'AdD est une technique d'analyse déductive qui utilise un modèle graphique avec une structure logique (l'arbre) pour représenter des événements conduisant à un certain résultat indésirable (défaillance du système). Il fonctionne en considérant d'abord un événement indésirable, comme une défaillance du système, et en le plaçant au sommet de l'arbre. C'est ce que l'on appelle l'événement «top» ou «l'événement indésirable». L'AdD travaille alors en arrière pour déterminer les causes de l'événement supérieur en termes de combinaisons logiques d'événements de défaillance de base (les événements basiques de l'arbre).

Comme l'objectif de l'AdD est d'obtenir des informations pour aider à la prise de décisions, il est utile de décrire brièvement quelques-unes des façons dont ajouter le fait. L'AdD est un outil polyvalent, et les informations qu'il obtient sont utiles pour une variété de tâches,

et pas seulement pour améliorer la fiabilité. Le Manuel de l'arbre de défaillances avec les applications aérospatiales, le manuel mis à jour, énumère un certain nombre d'utilisations de l'analyse des arbres de défaillance dans la prise de décision, énumérés ci-dessous :

1. Comprendre la logique qui mène à l'événement supérieur,
2. Donner la priorité aux contributeurs menant à l'événement supérieur,
3. Empêcher l'événement le plus important car il s'agit d'un outil pro-actif,
4. Suivre les performances du système,
5. Minimiser et optimiser les ressources de danger,
6. Aider à la conception du système,
7. Identifier et corriger les causes de l'événement supérieur car il s'agit d'un outil de diagnostic. (Vesely et al. 2002) [35].

Il existe un certain nombre de logiciels disponibles pour aider à automatiser l'AdD et de nouveaux sont continuellement développés. Certains des premiers logiciels AdD ont été créés au début des années 1970, lorsque l'AdD a commencé à devenir populaire ; parmi les plus célèbres les programmes PREP et KITT de Vesely (Vesely & Narum, 1970) [36]. Le Isograph's FaultTree + est un exemple de logiciel d'AdD plus moderne, capable de dessiner et d'analyser des arbres de défaillance (Isograph, 2002) [37].

Mais avant qu'il soit possible d'utiliser correctement les arbres de défaillance, il est important de comprendre ce qu'est un arbre de défaillance et ce que signifie précisément une «défaillance». Pour un tel mot simple, la «défaillance» dans l'arbre de défaillance à un nombre remarquable de nuances sémantiques et des significations différentes peuvent conduire à des interprétations différentes de l'arbre de défaillance. En outre, il existe différents types de défaillances et d'échecs, qui sont représentés de différentes manières dans un AdD.

Une défaillance est définie par (Villemeur 1992) [38] comme étant : "*Incapacité d'une entité à remplir une fonction requise.*"

Mais elle est définie par (Sundararajan 1991) [39] comme suit : "*Une défaillance est un non-respect des spécifications.*"

Quant à exactement ce que l'on entend par une défaillance, Villemeur nous dit qu'elle est: «*L'extinction de la capacité d'une entité d'exécuter une fonction requise*».

Et Sundararajan déclare que : "*La défaillance est l'incapacité d'un composant à exécuter sa fonction prévue comme spécifié.*"

Vous seriez pardonné de penser que ce ne sont pas vraiment très utile car les différences de sens entre les différentes définitions sont plutôt subtiles. Le manuel de l'arbre de défaillances avec des applications aérospatiales jette un peu de lumière sur la question en expliquant que si un défaut est toujours une défaillance, une défaillance n'est pas toujours un défaut, c'est-à-dire qu'il peut y avoir d'autres causes d'une défaillance en plus de défaut de l'entité elle-même. Une possibilité est celle d'une entité produite de manière incorrecte, de telle sorte qu'elle ne soit jamais en mesure d'exécuter sa fonction, et cela semblerait correspondre aux deux définitions ci-dessus d'une défaillance.

Bien que l'apparition d'une faille de conception ne soit pas remarquée, Le manuel de l'arbre de défaillances nous fournit une autre situation possible : une barrière capable de lever et abaisser pour bloquer une entrée. Si le moteur de la barrière a échoué, il ne pourrait plus s'ouvrir ou se fermer. Ce serait à la fois une défaillance et un défaut, puisqu'elle ne peut plus remplir son but. Cependant, si le mécanisme soulève la barrière lorsqu'il n'y a aucune exigence pour qu'elle permette l'entrée, alors que la barrière a subi une défaillance (parce qu'elle ne bloquait plus l'entrée), elle n'aurait pas subi un défaut parce que la barrière est toujours en fonction et encore capable de refermer.

La notion de temps est alors une composante importante d'une défaillance. Un défaut est plus étroitement défini qu'une défaillance et se produit quand une entité n'est plus capable de fonctionner ; C'est le contraire d'un succès. Une défaillance, au contraire, est plus inclusif car il inclut également des situations dans lesquelles l'entité fonctionne avec succès, mais au mauvais moment ou lieu :

"La définition correcte d'une défaillance nécessite la spécification non seulement de ce que l'état de composant est indésirable, mais aussi quand il se produit. Ce « ce » et « quand » devrait faire partie des descriptions d'événements qui sont entrés dans l'arbre de défaillance " (Vesely et al. 2002) [35].

De façon cruciale, la notion de défaillance permet aussi de considérer l'apport humain dans un système, et plus important encore l'erreur humaine. Si un opérateur humain avait quitté

la barrière, en admettant ainsi involontairement un accès non autorisé, ce serait une défaillance causée par une erreur humaine, mais pas un défaut de l'entité elle-même. Cette distinction importante entre défaillances et défauts permet donc également à l'analyste de considérer l'impact d'autres facteurs sur l'entité.

Cette distinction est souvent représentée par la classification des défaillances dans une des trois catégories dites primaires, secondaires et commandées :

- Une défaillance primaire se produit lorsqu'un composant subit une défaillance pendant le fonctionnement normal, c'est-à-dire que le composant fonctionne dans les conditions pour lesquelles il a été conçu, mais il échoue toujours. Cela pourrait être dû à l'usure de composante, par exemple.

- Une défaillance secondaire survient lorsqu'un composant subit une défaillance pendant un fonctionnement anormal, c'est-à-dire que le composant tombe en panne lorsqu'il fonctionne dans des conditions pour lesquelles il n'a pas été conçu. Un exemple serait un processeur d'ordinateur fonctionnant à des températures plus élevées qu'il était conçu pour faire face et ainsi surchauffer.

- Une défaillance de commande est lorsque le composant fonctionne normalement, mais il le fait dans les mauvaises circonstances, en raison d'un signal d'ordre incorrect. Un exemple de ce type de défaillance serait une bombe dont la gâchette fait exploser prématurément. La bombe était toujours destinée à exploser, donc il a rempli sa fonction correctement juste au mauvais moment.

Ici, on peut facilement voir que les défaillances primaires et secondaires sont normalement des défauts et sont souvent appelés défauts primaires et secondaires pour cette raison, mais une défaillance de commande n'est pas un défaut. Les défauts et les défaillances peuvent aussi être classés selon différents critères, tels que la façon dont ils se produisent soudainement (par exemple, graduel ou soudain), leur degré (par exemple partiel ou complet), quand ils se produisent pendant la vie de l'entité, et surtout, selon la gravité de leurs effets (par exemple mineure, critique ou catastrophique).

La figure I.4 montre un exemple simple d'arbre de défaillance. Les quatre nœuds circulaires représentent des défaillances contributives. Les portes ET (gauche) et OU (droite) ci-dessous montrent comment ces événements de base peuvent se combiner pour produire la défaillance du système en question. Dans chaque cas, le résultat à chaque étape est un résultat

binaire simple: soit l'événement se produit, soit il ne le fait pas. Tous les événements de la figure ont des descriptions au-dessus d'eux dans des cases rectangulaires, mais elles sont parfois omises dans les diagrammes simplifiés d'arbre de défaillance.

Les différents types de nœuds dans l'arbre de défaillance seront explorés plus en détail dans la section I.4.9.3, mais il existe une simple division dans les arbres de défaillance entre les événements intermédiaires et les événements de base. Les nœuds feuilles représentant des défaillances qui n'ont pas besoin de se développer.

Les événements basiques peuvent avoir des causes propres, mais ceux-ci ne sont pas considérés comme étant hors de portée ou ne sont pas pertinents pour le système. Par exemple, une défaillance du moteur peut être provoquée par l'usure qui est à son tour provoquée par le frottement entre les pièces mobiles, mais ce peut être un niveau inutile de détail ; comme un autre exemple, un système d'alarme peut échouer en raison d'un manque de puissance qui à son tour est causé par une coupure de courant secteur, dont les causes pourraient être une tempête électrique affectant la sous-station ou d'abaisser les lignes électriques, etc. Mais cela est hors de la portée du système analysé.

L'événement supérieur représente la défaillance du système étudiée et est habituellement représenté par une porte logique.

I.4.9.2 Cohérence des arbres de défaillance

Fondamentalement, les arbres de défaillance sont simplement une logique booléenne. Chaque événement se produit ou ne se produit pas et cela est représenté logiquement comme vrai ou faux, respectivement. Les événements sont alors combinés par des portes logiques (dont la plupart correspondent à des opérateurs booléens comme ET et OU), ce qui crée la structure logique de l'arbre. La nature booléenne des arbres de défaillance facilite leur évaluation, soit par ordinateur ou manuellement. La logique sous-jacente simple signifie également que beaucoup d'arbres de défaillance peuvent facilement être convertis en d'autres représentations plus appropriées pour l'analyse automatisée.

Une telle représentation est connue sous le nom de fonction de structure de l'arbre de défaillance. Une fonction de structure est une fonction représentant l'événement indésirable en termes d'événements de base. Tout d'abord, une variable booléenne (c'est-à-dire qui ne peut avoir que deux valeurs possibles, vrai ou faux) est attribuée à chacun des événements de base dans un arbre de défaillance. À l'aide de l'exemple de la figure I.4, nous pouvons utiliser les variables x_1 ,

x_2 , x_3 et x_4 pour chaque défaillance : détecteur de fumée, détecteur de chaleur, pompe d'eau et, blocage des buses d'arroseur, pour représenter si cet événement s'est produit ou non :

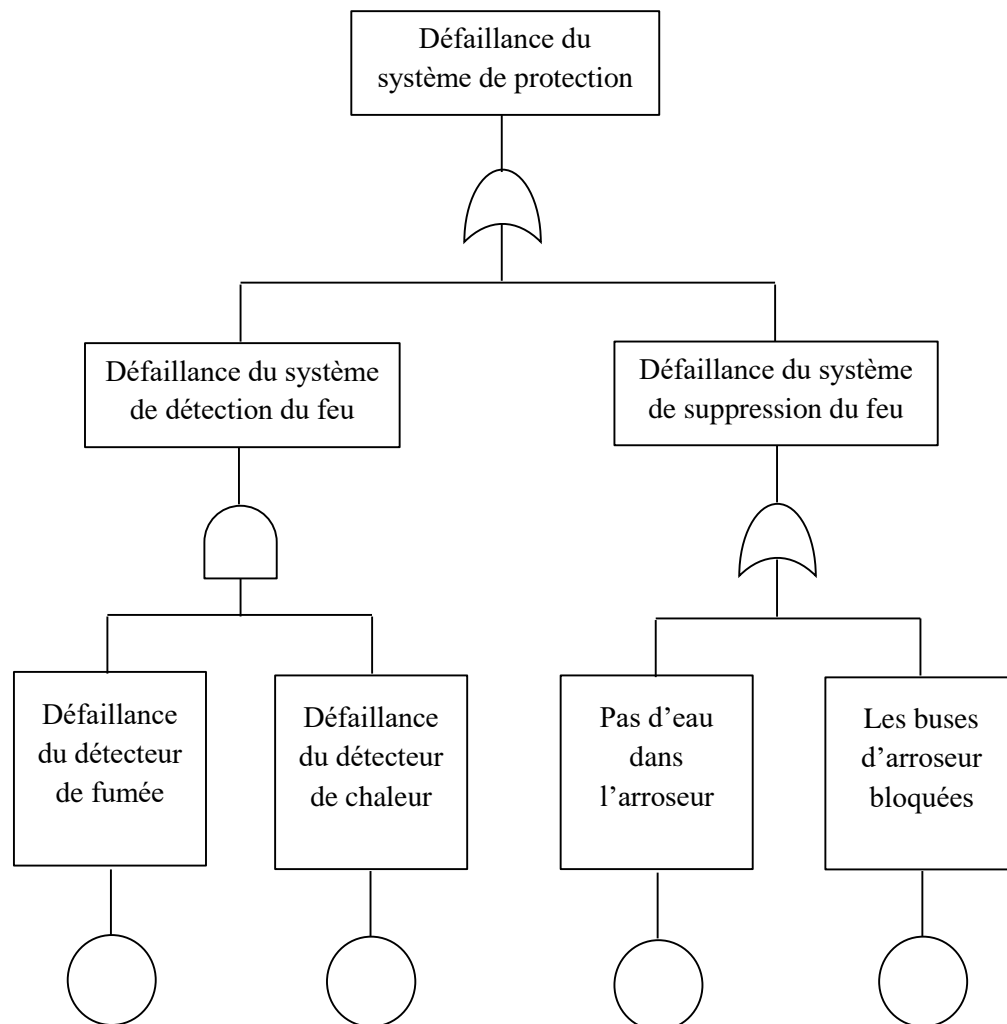


Figure I. 4 Exemple simple d'arbre de défaillance

$X_i = 1$ [l'événement s'est produit (= vrai)]

$X_i = 0$ [l'événement n'a pas produit (= faux)]

En utilisant z pour représenter l'événement indésirable, la fonction de structure est :

$$z = \phi(x) \quad \text{Où } x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$$

Pour une porte OU, la fonction de structure donne 1 si une entrée est vraie et 0 si toutes les entrées sont fausses, c'est-à-dire :

$$\exists i: x_i = 1 \rightarrow \phi(x) = 1$$

$$\forall i: x_i = 0 \rightarrow \phi(x) = 0$$

Pour une porte ET, la fonction de structure donne 1 si toutes les entrées sont vraies et 0 si une entrée est faux, c'est-à-dire :

$$\forall i: x_i = 1 \rightarrow \emptyset(x) = 1$$

$$\exists i: x_i = 0 \rightarrow \emptyset(x) = 0$$

Dans le cas de l'arbre de défaillance de la figure I.4, la fonction de structure est 1 si x_3 est 1, si x_4 est 1, ou si x_1 et x_2 sont 1 et 0 sinon. Cela peut être représenté par une table de vérité booléenne :

Tableau I. 3 La table de vérité booléenne

x_1	x_2	x_3	x_4	$\emptyset(x)$
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	0	1
1	1	1	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Une table de vérité peut être utilisée pour déterminer la valeur booléenne d'une fonction de structure (ou plus généralement, toute expression booléenne) à partir des valeurs booléennes de ses parties constitutives. Dans le tableau I.3, chaque ligne énumère les valeurs de chaque entrée (représentée par les quatre premières colonnes) et la valeur de sortie correspondante à la fonction de structure (la cinquième colonne). Tout arbre de défaillance booléen contenant

uniquement des portes ET et OU peut être représenté de cette façon par une table de vérité, mais comme la table doit contenir 2^n lignes où n est le nombre d'entrées, les tables de vérité sont peu pratiques pour les expressions avec un grand nombre d'entrées.

Cependant, les fonctions de structure sont importantes pour une autre raison, bien que les portes d'arbres de défaillances les plus courantes soient les portes booléennes standard ET et OU, il y en a d'autres, y compris les portes NOT et XOR, qui introduisent l'idée que la non-occurrence d'un événement peut contribuer à la défaillance du système en haut de l'arbre de défaillance (ou que l'occurrence d'un événement peut empêcher la défaillance du système). Un arbre de défaillance avec seulement des portes ET et OU sera toujours un arbre cohérent, alors qu'un arbre contenant des portes NOT est non cohérent. Un arbre peut s'avérer cohérent si sa fonction structure obéit aux restrictions suivantes :

- Chaque élément de la fonction de structure est pertinent, c'est-à-dire que tous les éléments de la fonction doivent affecter la sortie :

$$\emptyset(1, x_i) \neq \emptyset(0, x_i)$$

- La fonction de structure doit être non décroissante dans chaque x_i :

$$\emptyset(x) \geq \emptyset(y) \quad \text{si } x \geq y$$

Si un élément x_i devient vrai (c'est-à-dire qu'il souffre d'une défaillance), le système reste soit même ou se détériore - autrement dit, si un composant d'un système échoue, il ne conduira pas à une amélioration du fonctionnement du système.

En revanche, un arbre de défaillance non cohérent signifie que «les composants qui ne manquent pas, c'est-à-dire qui fonctionnent, contribuent au dysfonctionnement du système» (Andrews, 2000) [40]. Ainsi, dans un arbre non cohérent, un composant défaillant peut conduire au succès global du système. Le sens de la deuxième restriction pour les arbres cohérents devrait maintenant être plus clair : pour être non décroissant, une défaillance de composant doit soit provoquer une défaillance du système, soit ne pas modifier l'état du système.

La distinction entre les arbres cohérents et les arbres non cohérents est importante car ils doivent être manipulés de façon légèrement différente. Ainsi, la présence de autres portes que ET et OU peut altérer la structure logique de l'arbre de défaillance et nécessiter une forme différente (et normalement plus complexe) d'analyse qualitative.

L'analyse qualitative des arbres de défaillance repose sur les propriétés booléennes de l'arbre pour obtenir des équivalents logiques simplifiés qui donnent des informations plus facilement utilisables. En général, cela signifie obtenir les ensembles de coupes minimaux (ECM) de l'arbre de défaillance. Un ensemble de coupe est simplement une combinaison d'événements de base qui peuvent provoquer l'événement supérieur, et un ensemble de coupe minimal est un ensemble de coupe sans événements de base redondants, c'est-à-dire que tous les événements de base dans un ensemble de coupe minimal sont requis pour provoquer l'événement supérieur. L'ordre d'un ensemble de coupe minimal est le nombre d'événements de base qu'il contient: un ECM de premier ordre contiendrait un seul événement, tandis qu'un ECM de 5^{ème} ordre contiendrait cinq événements de base, qui doivent tous se produire pour provoquer l'événement supérieur. Les ensembles de coupe minimale sont utiles car ils sont de faible ordre, tels que le 1^{er} et le 2^{ème} ordre, indiquent des zones de vulnérabilité particulière et aident l'analyste à identifier les composants «critiques» sur lesquels repose le fonctionnement du système. Pour un ensemble de coupe minimale du 1^{er} ordre, un événement unique est tout ce qui est nécessaire pour provoquer l'événement supérieur (connu comme un seul point d'échec), et le composant en question serait donc un bon candidat pour la réplication et / ou le remplacement avec un plus fiable.

Cependant, l'utilisation d'arbres de défaillance non cohérents complique l'analyse qualitative car les coupes minimales ne s'appliquent plus. Il ne suffit plus d'indiquer quels événements se sont produits et il est également nécessaire d'indiquer quels événements ne se sont pas produits. Par conséquent, des implicants (analogues à des ensembles coupes) et plus important encore des implicants primaires (analogues à des ensembles coupes minimaux) sont utilisés. Alors qu'un ensemble de coupe est un ensemble d'événements qui doivent se produire pour provoquer l'événement supérieur, un implicant est un ensemble d'événements ou leurs compléments nécessaires pour provoquer l'événement supérieur, par exemple : A et B et non pas C. Les implicants contiennent généralement plus d'événements que les ensembles de coupe en raison de la nécessité de tenir compte de la non-occurrence des événements aussi. Un implicant premier est l'équivalent de l'ensemble de coupe minimal : c'est un implicant qui ne contient aucun autre implicant. Quelles que soient les différences, elles sont cependant utilisées de la même manière c'est-à-dire d'identifier les points faibles du système.

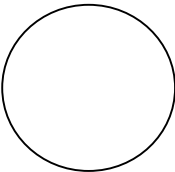
Bien qu'un arbre de défaillance soit purement un modèle qualitatif et transmet principalement la combinaison logique d'événements conduisant à une défaillance du système, il est également un modèle pratique à utiliser pour l'analyse quantitative, ce qui permet à l'analyste

d'obtenir des nombres et des statistiques sur le système. En incluant des informations supplémentaires dans le processus de modélisation, un arbre de défaillance peut être quantifié pour calculer la probabilité d'occurrence d'événement, ainsi que l'importance relative des événements contribuant. L'analyse quantitative est habituellement effectuée après l'analyse qualitative, car elle est plus efficace d'appliquer l'analyse probabiliste à un ECM ou d'implicants primaires que de l'appliquer à tous les ECM dans un arbre de défaillance (et il peut y avoir des dizaines de milliers pour les grands arbres). De cette façon, l'analyste découvre non seulement ce que sont les points faibles dans le système, mais découvre aussi comment ils sont faibles. Les deux formes d'analyse fournissent des informations qui pourraient être très utiles pour prendre des décisions concernant le développement d'un système quelconque.

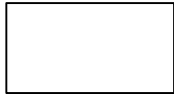
I.4.9.3 Symboles utilisés dans l'arbre de défaillance

Il y a eu plusieurs tentatives pour étendre les arbres de défaillance avec des portes et des symboles supplémentaires afin de représenter d'autres types d'informations dans l'arbre de défaillance (par exemple l'approche DFT de Vesely et al. (2002) [35], et l'approche TFT de Palshikar (2001) [41]) et il existe de nombreuses variations mineures dans l'apparence et la disposition des arbres de défaillance. Cependant, l'ensemble de symboles est commun à tous les arbres de défaillance et ces symboles, tel que définis dans le manuel d'arbre de défaillance de la NASA, peuvent être divisés en trois catégories: les symboles d'événement, de porte et de transfert, comme illustré ci-dessous. Il y a aussi les portes NOT mais celles-ci ne sont pas indiquées dans le manuel.

Tableau I. 4 *Symboles utilisés dans l'arbre de défaillance*

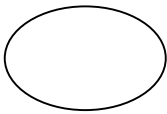
Symbole	Description
	Événement de base Un événement de base est une défaillance de base qui ne nécessite aucun développement ou expansion. Les événements de base forment les nœuds basiques de l'arbre et se combinent pour provoquer des événements intermédiaires et (en fin de compte) l'événement supérieur. Dans l'analyse qualitative, les ensembles de coupes sont composées d'événements de base, et dans l'analyse quantitative ; les événements de base sont habituellement assignés des taux de défaillance et des taux de réparation de sorte que l'indisponibilité d'événement supérieur puisse être calculée.

Événement intermédiaire



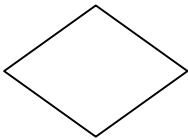
Un événement intermédiaire est une défaillance qui se produit en raison de combinaisons d'autres événements se produisant plus en aval de l'arbre. Pour cette raison, un événement intermédiaire est presque toujours un type de porte logique. L'événement supérieur est un événement spécial de ce type en haut de l'arbre.

Événement de conditionnement



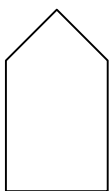
Un événement de conditionnement est un événement qui constitue une condition ou une contrainte particulière pour certains types de portes (par exemple les portes ET prioritaires et les portes INHIBIT). Par exemple, la porte INHIBIT n'est vraie que si toutes ses entrées sont vraies et si son événement de conditionnement est vrai. Un événement de conditionnement ne doit pas nécessairement être une défaillance ; il se peut que le système soit dans un état certain.

Événement non développé



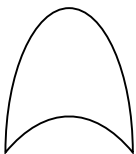
Un événement non développé est un événement intermédiaire dont les événements contributifs ne sont pas pris en compte dans l'analyse. Cela peut être dû à des informations insuffisantes sur cet événement ou peut-être parce que l'événement est considéré comme sans conséquence. Il peut, par exemple, avoir une faible probabilité d'occurrence qu'il serait inutile dans l'analyse.

Événement externe



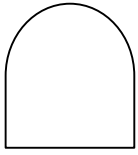
Un événement externe est un événement qui n'est pas une défaillance, c'est-à-dire un événement qui pourrait se produire pendant le fonctionnement normal d'un système. Il est utilisé pour représenter des événements qui normalement ne causeraient aucun problème, mais en combinaison avec d'autres événements, peut conduire à un événement indésirable.

Porte OU



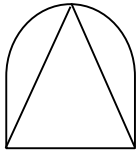
La porte OU est vraie si l'un de ses événements d'entrée est vrai. La porte OU ne représente pas nécessairement une relation causale entre ses entrées et ses sorties ; Chacune des entrées est souvent un retraitement de la sortie. Par exemple, la vanne de sortie ouverte qui peut être décrite plus en détail comme la soupape laissée ouverte pendant l'entretien, ou la soupape ouverte en raison d'une défaillance mécanique, mais les deux descriptions se rapportent au même résultat : la soupape est ouverte et les entrées n'ont pas provoqué la sortie.

Porte ET



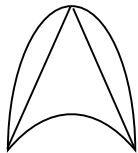
La porte ET est vraie si tous ses événements d'entrée sont vrais, une porte ET représente typiquement une relation causale entre ses entrées et ses sorties ; C'est-à-dire que la combinaison de défaillances d'entrée provoque la défaillance de sortie. Exemple, pas d'alimentation vers le système pourrait être causée par «panne de batterie» et «panne de générateur», mais pas par un seul.

Porte Priorité ET (PAND)



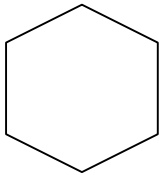
La porte PAND est seulement vraie si tous ses événements d'entrée sont vrais et qu'ils se produisent dans un certain ordre. L'ordre peut être spécifié par un événement de conditionnement distinct, mais il est souvent omis.

Porte exclusive OU (XOR)



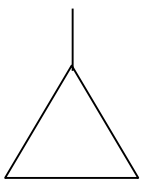
La porte XOR est vraie si un seul et seulement un de ses événements d'entrée est vrai.

Porte INHIBIT



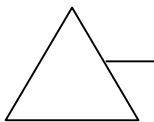
La porte INHIBIT est un cas particulier de la porte ET dans laquelle la sortie de la porte n'est vraie que lorsque l'événement d'entrée est vrai alors qu'un événement de conditionnement est également vrai. Par exemple, une réaction explosive ne peut avoir lieu que si au-dessus d'une certaine température ou d'un catalyseur est présent, même si les ingrédients constitutifs sont présents. Il est également connu comme une porte IF, mais en termes logiques, il fonctionne comme une porte ET normale.

Transfère In



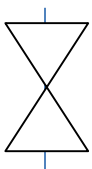
Cela indique que cette branche particulière de l'arbre est affichée au symbole Transfère Out correspondant. Il est utilisé pour économiser de l'espace ou pour indiquer une branche partagée.

Transfère Out



Cela signifie que cette branche se connecte au reste de l'arbre au transfert correspondant. Les symboles de transfert sortant peuvent être utilisés pour représenter des branches partagées (c'est-à-dire plusieurs portes de transfert en liaison avec une seule sortie de transfert).

Porte NOT ou événements complémentaires



Ils inversent la valeur d'un événement, c'est-à-dire si nous avons un événement X, alors NOT (X) est vrai seulement si X n'a pas eu lieu, et faux s'il s'est produit.

I.4.10 L'arbre des événements

L'arbre des événements est une méthode inductive utilisée largement dans l'analyse quantitative de risques et l'évaluation de la sécurité. Il est utilisé pour analyser des itinéraires de progression possibles provenant d'un événement initiateur, tout en étant affecté par une séquence d'autres événements classés par ordre chronologique. Dans l'analyse de sûreté, l'arbre des événements est utilisé pour quantifier la probabilité de scénarios possibles d'accident résultant de la survenance d'un événement dangereux, comme événement déclencheur. La progression de l'événement d'initiation peut être soit atténuée, soit augmentée en fonction du succès ou de l'échec des barrières de sécurité subséquents, respectivement. En atteignant une barrière de sécurité, l'arbre des événements est habituellement ramifié en deux; La branche ascendante indique le fonctionnement de la barrière de sécurité alors que la partie inférieure représente sa défaillance.

L'arbre des événements a été utilisé dans le domaine de la modélisation des accidents (Bearfield et Marsh, 2005 [42] ; Rathnayaka et al. 2011 [43]), l'évaluation dynamique des défaillances (Meel et Seider, 2006) [44] et l'évaluation dynamique des risques (Kalantarnia et al. 2009 [45] ; Kalantarnia et al. 2010 [46]). La figure I.5 illustre l'exemple de l'arbre d'évènement d'un tuyau de gaz arraché.

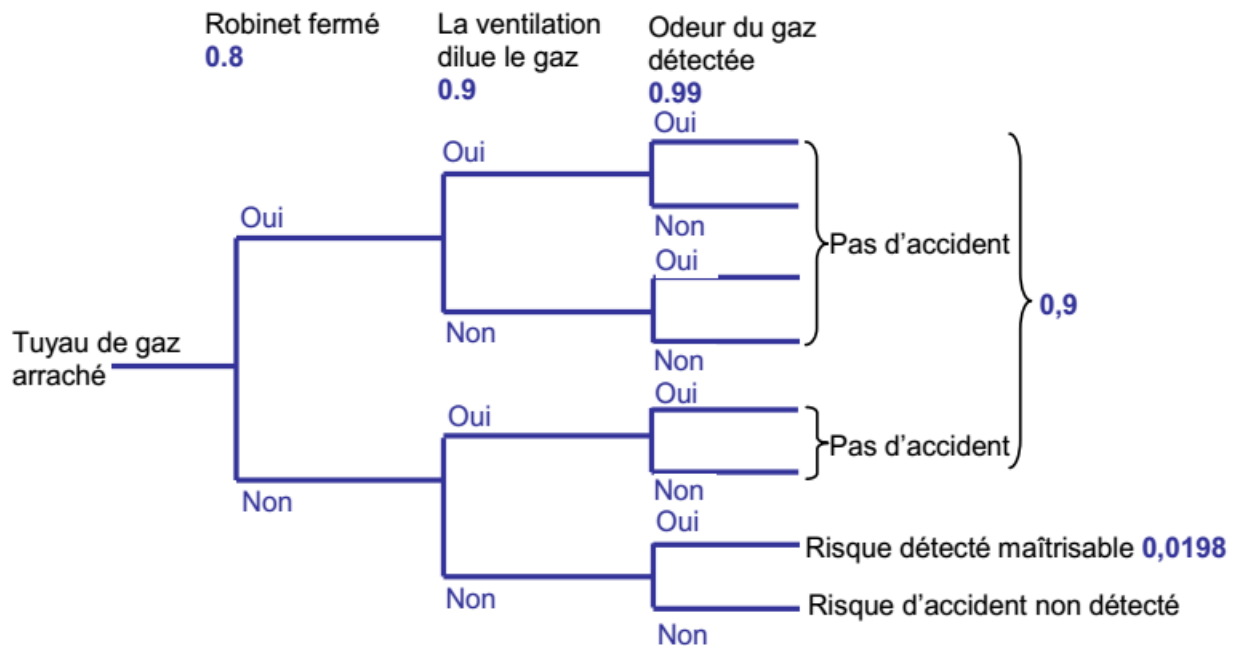


Figure I. 5 Arbre d'évènement « tuyau de gaz arraché »

I.4.11 Nœud papillon

Le nœud papillon est l'une des meilleures approches graphiques pour représenter un scénario d'accident complet, à partir de causes d'accident et se terminant par ses conséquences. Tout en étant centré sur un événement critique, Il est composé d'un arbre de défaillance sur le côté gauche identifiant les événements possibles provoquant l'événement critique et un arbre d'événements sur le côté droit montrant les conséquences possibles de l'événement critique basé sur l'échec ou le succès des fonctions de sécurité (Delvosalle et al., 2005 [47] ; Delvosalle et al., 2006) [48]).

I.5 Conclusion

Nous avons abordé au début de ce chapitre en détails les définitions normatives pour la notion de l'analyse de risque.

Il a été accentué aussi dans ce chapitre, la nécessité d'utiliser les analyses des risques pour appréhender les mécanismes des défaillances des systèmes, et d'utiliser leurs concepts théoriques pour l'analyse du comportement des systèmes industriels en vue de leur compréhension.

Les analyses des risques, leurs concepts, leurs outils et leurs approches sont ensuite présentés dans ce chapitre. Ces méthodes permettent aussi une analyse sérieuse, rigoureuse et approfondie de la défaillance des systèmes, et la modélisation comportementale de leurs fonctionnements et de dysfonctionnement, selon des étapes systémiques qui vont être privilégiés et ré envisagés dès la conception des systèmes. Ces étapes intègrent l'ensemble des réactions qui peuvent exister dans un système évoluant dans un environnement spécifique.

CHAPITRE II

L'approche Bayésienne et son rôle dans l'évaluation des risques

**CHAPITRE II: L'approche Bayésienne et son rôle dans l'évaluation des
risques**

Chapitre II : L'approche Bayésienne et son rôle dans l'évaluation des risques

II.1 Introduction

Ce chapitre fournit une explication détaillée des réseaux causaux et des réseaux bayésiens ainsi que le calcul probabiliste nécessaire. Les sujets seront expliqués à l'aide d'un exemple : l'herbe humide. Premièrement, les réseaux causaux et les principes de base du raisonnement sous incertitude seront expliqués. Ensuite, nous définirons les réseaux bayésiens. Enfin nous allons fournir un aperçu du rôle des réseaux bayésiens dans l'évaluation des risques par l'examen d'un ensemble de recherches.

L'information causale codée dans les réseaux bayésiens facilite l'analyse des séquences d'action, leurs conséquences, leur interaction avec les observations et leurs utilités attendues, et donc la synthèse des plans et des stratégies sous l'incertitude. C'est-à-dire que les réseaux bayésiens traitent très bien le raisonnement sous incertitude.

La similarité entre la topologie des réseaux bayésiens et les mécanismes stables qui opèrent dans l'environnement facilite la reconfiguration modulaire du réseau comme réponse à l'évolution des conditions, et elle permet un raisonnement délibératif sur les nouvelles situations (Pearl 1997) [49].

Comme le raisonnement sous incertitude est l'un des avantages des réseaux causaux et bayésiens, il est nécessaire de fournir quelques détails sur les principes du raisonnement sous incertitude. La section suivante fournit des principes de base pour le raisonnement sous incertitude.

II.2 Principes de base du raisonnement sous incertitude

Le problème fondamental du raisonnement sous incertitude est de savoir si l'information sur un événement influence notre croyance sur d'autres événements. Les systèmes basés sur des règles ne peuvent pas capturer le raisonnement dans l'incertitude parce que la dépendance entre les événements se change avec la connaissance d'autres événements. Le problème sera exploré avec l'exemple suivant.

II.2.1 Herbe humide

Le reste du chapitre sera expliqué avec l'exemple de l'herbe humide pour montrer le processus de raisonnement. M. Holmes quitte sa maison le matin et remarque que son herbe est humide. Il raisonne qu'il a plu la nuit dernière. Puis il pense que l'herbe de son voisin M. Watson est probablement humide aussi. C'est-à-dire que l'information selon laquelle l'herbe de M. Holmes est humide a une influence sur sa croyance sur le statut de l'herbe de M. Watson. Maintenant, supposons que M. Holmes vérifie son compteur de pluie, et il est sec. Alors il ne raisonnera pas comme ci-dessus, et l'information sur l'herbe de M. Holmes n'a aucune influence sur sa croyance sur l'herbe de M. Watson.

Ensuite, considérons deux causes possibles de l'herbe humide. Outre la pluie, M. Holmes a peut-être oublié de mettre son arroseur hors tension. Le lendemain matin, supposons que M. Holmes remarque à nouveau que son herbe est humide. La croyance de M. Holmes à l'égard de la pluie et des arroseurs augmente. Puis il remarque que l'herbe de M. Watson est humide, et il conclut qu'il a plu la nuit dernière. La dernière étape est pratiquement impossible à travers des règles, mais naturel pour les êtres humains, appelé expliquer loin.

II.2.2 Expliquer loin

Expliquer loin est le processus de diminuer sa croyance dans un événement causal comme un résultat dans une augmentation de la croyance d'un événement causal alternatif. Expliquons-le avec notre exemple. Après avoir vu que l'herbe de M. Watson est humide le lendemain matin, M. Holmes a conclu qu'il avait plu. Par conséquent, l'herbe humide de M. Holmes a été expliquée par la pluie, et donc il n'y a plus aucune raison de croire que l'arroseur a été sur tension. Expliquer loin est un autre exemple de dépendance changeant avec les informations disponibles (Jensen 1996) [50]. La section suivante fournit des détails sur la dépendance entre les événements.

II.2.3 Dépendance des événements

La dépendance entre deux événements est quand la probabilité d'un événement dépend de la connaissance de l'autre événement. Par exemple, lorsque rien n'est connu dans l'état initial, les variables pluie et arroseur sont indépendants. D'autre part, lorsque l'information sur l'herbe de M. Holmes est présente, alors la pluie et les arroseurs deviennent dépendants. C'est-à-dire, le changement dans la croyance en si elle a plu ou non changera la croyance dans l'arroseur étant sur ou hors tension. S'il pleuvait, les arroseurs n'étaient pas allumés sinon, les arroseurs étaient sur tension. Bien sûr, cela n'est vrai que s'il n'y a pas d'autre variable qui cause l'humidité de l'herbe de M. Holmes. De l'autre côté, si les informations sur l'herbe de M. Holmes ne sont pas présentes, alors nous ne pouvons pas faire le lien entre les variables pluie et arroseur. La dépendance entre les événements sera plus claire lorsque nous introduirons le concept des réseaux causaux.

Les certitudes antérieures sont également un concept important dans le raisonnement sous incertitude. Le paragraphe suivant présentera l'importance des certitudes antérieures pour le raisonnement.

II.2.4 Certitudes antérieures

Dans l'exemple ci-dessus, il est évident que si un événement est connu, la certitude sur les autres événements doit être modifiée. Dans un calcul de certitude, si la certitude réelle d'un événement spécifique doit être calculée ; la connaissance des certitudes avant toute information est également requise. Par exemple, la certitude de la pluie est encore dépendante de savoir si la pluie pendant la nuit est rare ou très commun étant donné que l'herbe de M. Holmes est humide (Pearl 1988) [51].

Puisque les principes de base du raisonnement sous la certitude sont fournis ci-dessus, maintenant des réseaux causaux peuvent être introduits. La section suivante présente les réseaux causaux et fournit des définitions connexes telles que les types de connexion et la d-séparation.

II.3 Réseaux causaux

Le raisonnement ci-dessus peut être décrit par un graphique. Les événements sont deux nœuds A et B, ils sont connectés par une liaison dirigée de A vers B si A a un impact causal sur B. La Figure II.1 est un modèle graphique pour le petit monde de M. Holmes de l'herbe humide.

Un réseau causal est composé d'un ensemble de variables et d'un ensemble de liens dirigés entre les variables. Dans la littérature mathématique, cette composition s'appelle un graphe dirigé. Dans un graphe dirigé, la terminologie des relations familiales est adoptée pour expliquer les relations entre les variables. S'il existe un lien de la variable A à la variable B, alors A est appelé un parent de B et B est appelé un enfant de A. Les variables symbolisent des événements. Chaque variable d'un réseau causal a deux états (oui ou non) ou plus (c'est-à-dire la couleur d'une voiture: bleu, vert, rouge ou noir). En général, les variables peuvent avoir des états continus et discrets. Le raisonnement de l'incertitude a également une partie quantitative, comme le calcul et la combinaison de numéros de certitude (Pearl 1988) [51].

Les valeurs de certitude sont les probabilités de l'événement (variables), compte tenu des données.

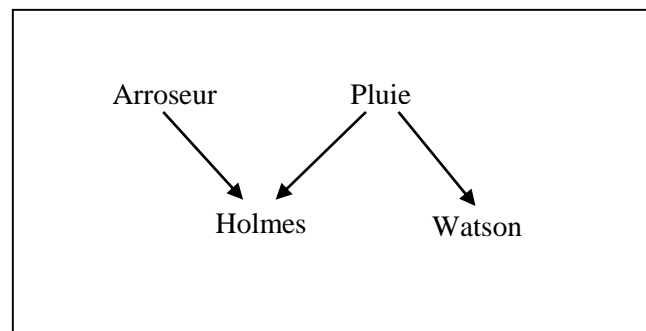


Figure II. 1 *Un modèle graphique pour l'herbe humide*

À partir du graphique de la figure II.1, on peut lire les dépendances et les indépendances dans le petit monde de l'herbe humide. Par exemple, on peut voir que le fait de savoir qu'il n'a pas plu ce soir, les informations sur l'herbe de M. Watson n'ont aucune influence sur l'herbe de M. Holmes. La manière dont l'influence peut s'exercer entre les variables d'un réseau causal a été analysée par Pearl 1986 [52] et Verna 1987 [53]. On dit que deux variables sont séparées si de nouvelles preuves sur l'une d'elles n'ont aucun impact sur notre croyance de l'autre. Si l'état d'une variable est connu, alors nous disons qu'il est instancié.

Il existe trois types de connexions dans un réseau causal: série, divergente et convergente. La figure II.2 montre tout type de connexions dans un réseau causal.

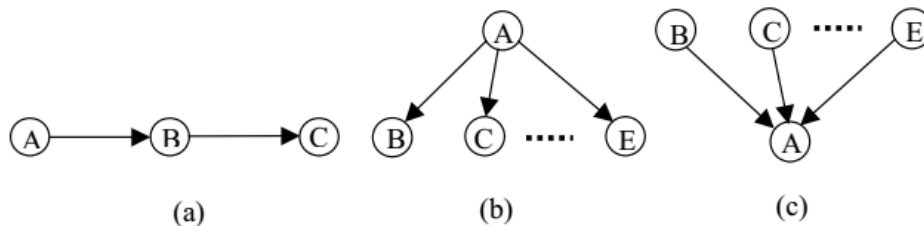


Figure II. 2 Connexions en série, divergentes et convergentes respectivement

Dans la figure II.2 (a), la variable A a un contrôle sur la variable B qui a alors un contrôle sur la variable C. Apparemment, la preuve sur la variable A affectera la certitude de la variable B qui à son tour affectera la certitude de la variable C. De façon analogue, l'évidence sur la variable C affectera la certitude de la variable A par la variable B. Au contraire, si l'état de la variable B est donné, alors le lien est bloqué c'est-à-dire la variable A et la variable C deviennent indépendantes. En d'autres termes, l'influence peut aller de A à C et vice versa sauf si B est instancié.

Comme le montre la figure II.2 (b), dans une connexion divergente l'influence peut passer entre tous les enfants de la variable A sauf si l'état de la variable A est donné. Si l'on connaît l'état de la variable A, alors les variables B, C, ..., E deviennent indépendantes l'une de l'autre. Par conséquent, l'influence peut se produire entre les enfants de A, sauf si A est instancié.

Dans une connexion convergente démontrée par la figure II.2 (c), s'il n'y a rien connu de la variable A autre que ce qui peut être déduit de la connaissance de ses parents B, C, ..., E, alors les parents sont dits indépendants. L'indépendance signifie que la preuve sur l'un des parents n'a aucun effet sur la certitude des autres. S'il existe un autre type de preuve influençant la variable A, alors les parents deviennent dépendants grâce au principe de l'explication. Par conséquent, les éléments de preuve ne peuvent être transmis par une connexion convergente que si la variable dans la connexion ou l'un de ses descendants ont reçu des preuves. La preuve peut être une preuve directe de la variable A, ou elle peut être la preuve d'un de ses enfants. Dans les réseaux causaux, ce fait est appelé dépendance conditionnelle.

Jensen [54] a déclaré que la preuve sur une variable est un énoncé des probabilités de ses états. Si l'énoncé soutient l'état exact de la variable, il est appelé preuves tangibles. Autrement, il est exprimé des preuves douces. Par exemple, des preuves douces peuvent être des preuves indiquant les probabilités des états d'une variable. Les preuves tangibles sont également appelées instantiation. Dans le cas de connexions séries et divergentes, le blocage d'un lien nécessite des

preuves tangibles, tout en ouvrant un lien est possible pour tous les types de preuves (Pearl 1988) [51].

Les trois cas exposés ci-dessus recouvrent toutes les formes dans lesquelles les éléments de preuve peuvent être transmis par l'intermédiaire d'une variable. Si les règles ci-dessous sont suivies, il est concevable de décider pour n'importe quelle paire de variables dans un réseau causal, qu'elles soient ou non dépendantes en sachant la preuve entrée dans le réseau. On dit que deux variables A et B sont d-séparées si, pour tous les chemins entre les variables A et B, il existe une variable intermédiaire V :

- La connexion est sérielle ou divergente et l'état de V est connu ; ou
- La connexion convergente et ni V ni aucun des descendants de V si ils n'ont reçu de preuve (Pearl 1988) [51].

Si les variables A et B ne sont pas d-séparées, on dit qu'elles sont d-connectées. Par exemple, si l'état de la variable B est donné dans la figure II.2 (a), alors le lien est bloqué et la variable A et la variable C deviennent indépendantes. Par conséquent, on dit que la variable A et la variable C sont d-séparées en fonction de la variable B. De même, dans la figure II.1, Arroseur et Watson sont d-séparés parce que la piste de connexion convergente autour de la variable Holmes.

Il faut noter que la d-séparation est une propriété du raisonnement humain (Jensen 1996) [54], et donc tout calcul de l'incertitude dans les structures causales doit obéir au principe que chaque fois que A et B sont séparés, de nouvelles informations sur l'une d'entre elles ne changent pas la certitude de l'autre. Pour mieux comprendre les réseaux causaux, nous devons établir la partie quantitative de l'évaluation de la certitude. La prochaine section fournira le calcul de probabilité nécessaire pour l'évaluation de la certitude.

II.4 Calcul de probabilité

Même si divers calculs de certitude existent dans la littérature, cette section fournit le calcul bayésien, qui est le calcul de probabilité classique. La section commence par le calcul de probabilité de base. Ensuite, le concept de probabilité subjective et de probabilité conditionnelle sera introduit.

II.4.1 Calcul de probabilité de base

Le concept de base dans le traitement bayésien des certitudes dans les réseaux causaux est la probabilité conditionnelle. Lorsque la probabilité d'un événement A, $P(A)$ est connue, elle est conditionnée par d'autres facteurs connus. Un énoncé de probabilité conditionnelle a la forme suivante :

Étant donné l'événement B, la probabilité de l'événement A est x.

La représentation mathématique de cette affirmation est $P(A | B) = x$. Cela ne signifie pas que B est vrai, alors la probabilité pour A est x. Cela signifie que si B est vrai et tout ce qui est connu est inapplicable à A, alors $P(A | B) = x$.

La règle fondamentale pour le calcul de probabilité est donnée de la manière suivante dans (Pearl 1988) [51] ;

$$P(A|B) P(B) = P(A, B) \quad (\text{II. 1})$$

Où $P(A, B)$ est la probabilité de l'événement conjoint $A \wedge B$. Puisque les probabilités doivent toujours être conditionnées par un contexte C, la formule doit être écrite comme :

$$P(A|B, C) P(B|C) = P(A, B|C) \quad (\text{II. 2})$$

De (II.1), on peut écrire que $P(A | B) P(B) = P(B | A) P(A)$ et ceci donne la fameuse règle de Bayes :

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)} \quad (\text{II. 3})$$

Si nous conditionnons la règle de Bayes, nous obtiendrons ce qui suit ;

$$P(B|A, C) = \frac{P(A|B, C)P(B|C)}{P(A|C)} \quad (\text{II. 4})$$

Si A est une variable dans un réseau causal avec l'ensemble des états a_1, a_2, \dots, a_n , alors la $P(A)$ est une distribution de probabilité sur cet ensemble d'états :

$$P(A) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad x_i \geq 0 \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1$$

Où x_i est la probabilité que A soit dans l'état a_i . On notera que la probabilité que A soit dans l'état a_i soit exprimée comme $P(A = a_i)$ et exprimée comme $P(a_i)$ si la variable est évidente à partir du contexte. Soit B une autre variable avec les états b_1, b_2, \dots, b_m , alors $P(A | B)$ est une table n-par-m composée des nombres $P(a_i | b_j)$. Cette table est appelée table de probabilité conditionnelle (TPC) pour $P(A | B)$.

La probabilité conjointe pour les variables A et B, $P(A, B)$ est également une table n-par-m contenant les probabilités $P(a_i, b_j)$. Les probabilités conjointes, $P(A, B)$, peuvent être calculées en utilisant la règle fondamentale (II.1) :

$$P(a_i, b_j) = P(a_i | b_j)P(b_j)$$

Ou de manière équivalente,

$$P(A, B) = P(A|B)P(B) \quad (\text{II. 5})$$

La probabilité conjointe, $P(A, B)$, a n·m entrées. La probabilité $P(A)$, peut être calculée à partir de la table $P(A, B)$. Soit a_i un état de la variable A. Dans le tableau $P(A, B)$, Il existe m événements différents pour lesquels la variable A est à l'état a_i , à savoir les événements mutuellement exclusifs $(a_i, b_1), \dots, (a_i, b_m)$. Par conséquent, $P(a_i)$ peut être calculé comme ;

$$P(a_i) = \sum_{j=1}^m P(a_i, b_j) \quad (\text{II. 6})$$

Cette opération est appelée marginalisation et on dit que la variable B est marginalisée hors de $P(A, B)$ (produisant $P(A)$). Ainsi, la notation peut être écrite comme suit :

$$P(A) = \sum_B P(A, B) \quad (\text{II. 7})$$

Les définitions ci-dessus ne s'appliquent qu'aux probabilités classiques (objectives). Les réseaux causaux ont un autre type de probabilité, appelée probabilité subjective. La probabilité subjective est l'une des caractéristiques importantes des réseaux causaux en raison de leur capacité à expliquer leur croyance sur un événement.

II.4.2 Probabilités subjectives

Le calcul de probabilité n'exige pas que les probabilités soient basées sur des résultats théoriques ou des fréquences d'expériences répétées. Les probabilités peuvent également être des estimations totalement subjectives de la certitude d'un événement. Par exemple, une probabilité subjective peut être mon évaluation personnelle des chances de terminer ma thèse à la fin du semestre d'automne prochain. Jensen [54] fournit un moyen d'évaluer cette probabilité par comparaison au jeu (Pearl 1988) [51].

La probabilité subjective est également appelée probabilité bayésienne ou probabilité personnelle dans la littérature (Heckerman 1995) [55]. La probabilité bayésienne d'un événement x est le degré de croyance d'une personne dans cet événement. Une probabilité bayésienne est une propriété de la personne qui attribue la probabilité (Par exemple, votre degré de croyance qu'une pièce de monnaie va atterrir tête), alors qu'une probabilité classique est une propriété physique du monde (Par exemple, la probabilité qu'une pièce de monnaie va se poser tête). A la lumière de ces affirmations, un degré de croyance en un événement est désigné comme une probabilité bayésienne ou personnelle, et la probabilité classique est appelée la probabilité vraie ou physique de cet événement (Heckerman 1995) [55].

Une différence importante entre la probabilité physique et la probabilité personnelle est qu'il n'est pas nécessaire de répéter les essais pour mesurer la probabilité personnelle. Par exemple, considérez la question : quelle est la probabilité que la machine tombe en panne ? La méthode bayésienne peut assigner une probabilité pour cet événement. Une critique commune de l'approche bayésienne de la probabilité est que les probabilités semblent arbitraires. Cela peut être principalement observé comme un problème d'évaluation de la probabilité. Beaucoup de recherches ont été faites pour surmonter ce problème. Une construction détaillée de cette critique peut être trouvée dans (Heckerman 1995) [55].

Un autre concept important dans les réseaux causaux est l'indépendance conditionnelle entre les variables. Le paragraphe suivant décrit son importance dans le calcul bayésien.

II.4.3 Indépendance conditionnelle

Dans le calcul bayésien, le blocage de l'influence entre les variables se reflète dans le concept de l'indépendance conditionnelle. Les variables A et C sont indépendantes compte tenu de la variable B si :

$$P(A|B) = P(A|B, C) \quad (\text{II. 8})$$

Cela signifie que si l'état de la variable B est donné alors aucune information de la variable C modifiera la probabilité de la variable A. L'indépendance conditionnelle apparaît dans les cas de connexions série et divergentes. Si (II.8) est retenu, alors par la règle de Bayes conditionnée (II.4), on obtient :

$$P(C|B, A) = \frac{P(A|C, B)P(C|B)}{P(A|B)} = \frac{P(A|B)P(C|B)}{P(A|B)} = P(C|B) \quad (\text{II. 9})$$

Ainsi, les équations (II.8) et (II.9) sont maintenues simultanément.

Avec cette explication des réseaux causaux et du calcul bayésien, nous pouvons maintenant explorer les réseaux bayésiens. La section suivante décrira la structure du réseau bayésien et fournira ses propriétés en détail.

II.5 Réseaux bayésiens

Comme indiqué précédemment, les réseaux causaux sont introduits pour définir et comprendre les réseaux bayésiens. Les paragraphes suivants fournissent une définition détaillée des réseaux bayésiens et des théorèmes connexes. Le théorème de la règle de chaîne est introduit pour effectuer les calculs nécessaires dans les réseaux bayésiens.

Les relations de causalité ont également un aspect quantitatif, à savoir leur force. Ceci exprimé en attachant des nombres aux liens. Soit la variable A un parent de la variable B dans un réseau causal. En utilisant le calcul de probabilité, il sera normal de laisser la probabilité conditionnelle, $P(B | A)$, être la force du lien entre ces variables. En revanche, si la variable C est aussi un parent de la variable B, les probabilités conditionnelles $P(B | A)$ et $P(B | C)$ ne fournissent aucune information sur la façon dont les impacts de la variable A et de la variable B interagissent. Ils peuvent coopérer ou s'opposer de diverses façons. Par conséquent, la spécification de $P(B | A, C)$ est requise.

Il peut arriver que le domaine à modéliser contienne des cycles de rétroaction. Les cycles de rétroaction sont difficiles à modéliser quantitativement. Pour les réseaux causaux, aucun calcul n'a été développé pour faire face aux cycles de rétroaction. Par conséquent, il est nécessaire que le réseau ne contienne pas de cycles. Ainsi, un réseau bayésien se compose des éléments suivants :

- Un ensemble de variables et un ensemble des arcs dirigés entre les variables,
- Chaque ensemble contient un ensemble fini d'états mutuellement exclusifs,
- Les variables couplées aux bords dirigés construisent un graphe acyclique dirigé (GAD),
- Chaque variable A avec les parents B_1, B_2, \dots, B_n possède une table de probabilité conditionnelle $P(A | B_1, B_2, \dots, B_n)$ associée à celle-ci (Pearl 1988) [51].

Si la variable A n'a pas de parent, la table peut être remplacée par les probabilités inconditionnelles $P(A)$. Un graphe est acyclique s'il n'y a pas de chemin dirigé $A_1 \rightarrow \dots \rightarrow A_n$ tel que $A_1 = A_n$. Pour le graphe acyclique dirigé de la figure II.3, les probabilités antérieures $P(A)$ et $P(B)$ doivent être spécifiées.

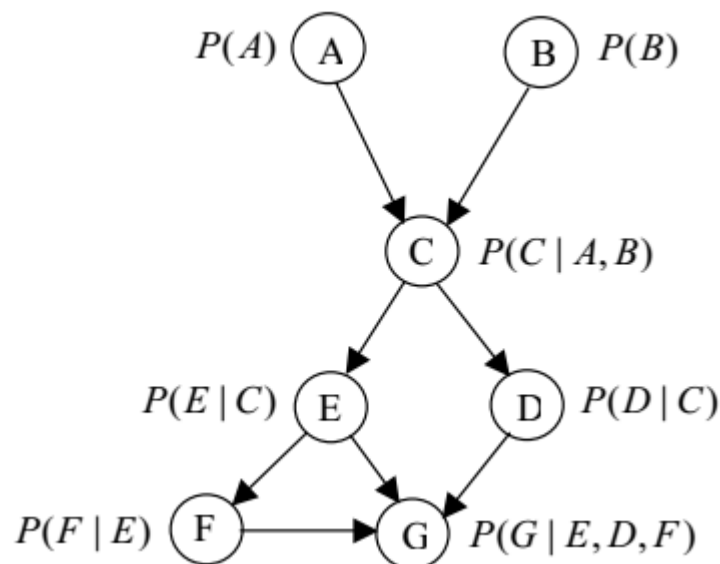


Figure II. 3 Un graphe acyclique dirigé

On a insisté sur le fait que les probabilités antérieures introduisent un biais indésirable au modèle. Les calculs nécessaires ont été développés pour éviter ce problème (Jensen 1996) [54]. D'autre part, comme expliqué précédemment, les probabilités antérieures sont essentielles. Elles sont importantes non pas pour des raisons mathématiques, mais parce que les évaluations de la certitude antérieure font partie intégrante du raisonnement humain sur la certitude.

L'un des avantages des réseaux bayésiens est qu'ils admettent la d-séparation. Si Les variables A et B sont d-séparées dans un réseau bayésien avec la preuve e insérée, alors $P(A | B, e) = P(A | e)$. Par conséquent, la d-séparation peut être utilisée pour lire des indépendances conditionnelles. Ensuite, nous allons parler de l'un des éléments les plus cruciaux des calculs du réseau bayésien, à savoir la règle de la chaîne.

II.5.1 La règle de la chaîne

Dans un réseau bayésien, soit $U = (A_1, A_2, \dots, A_n)$, être un univers de variables, la règle de chaîne fournit une représentation plus compacte de la probabilité conjointe $P(U) = P(A_1, A_2, \dots, A_n)$ l'on obtient la table de probabilité conjointe $P(U)$, on peut calculer les probabilités $P(A_i)$ ainsi que les probabilités $P(A_i | e)$, où e est évidente. Si le nombre de variables dans le réseau augmente, $P(U)$ se développe de façon exponentielle, il faut donc une représentation plus compacte de $P(U)$: une manière de réserver l'information à partir de laquelle $P(U)$ peut être calculée si nécessaire (Pearl 1988) [51].

Une telle représentation réside dans un réseau bayésien sur U . $P(U)$ peut être calculée à partir des probabilités conditionnelles définies dans un réseau bayésien si les indépendances conditionnelles tiennent pour U . Le théorème suivant explique cette représentation :

Soit un réseau bayésien sur : $U = (A_1, A_2, \dots, A_n)$.

Alors la distribution de probabilité jointe $P(U)$ est le produit de toutes les probabilités conditionnelles spécifiées dans RB :

$$P(U) = \prod_i P(A_i | pa(A_i)) \quad (\text{II. 10})$$

Où $pa(A_i)$ est l'ensemble parent de A_i .

Jensen [54] a prouvé ce théorème en appliquant l'induction sur le nombre de variables dans l'univers U (Pearl 1988) [51]. La section suivante fournira des détails théoriques et historiques sur le raisonnement de l'évidence en utilisant la règle de la chaîne.

II.5.2 Raisonnement évident

Comme nous l'avons dit plus haut, les réseaux bayésiens réalisent cette économie en indiquant pour chaque variable X_i les probabilités conditionnelles $P(X_i | pa_i)$ où pa_i sont l'ensemble des parents (X_i) qui rend X_i indépendante de tous ses autres parents. Après avoir donné cette spécification, la distribution de probabilité conjointe peut être calculée par le produit :

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_i P(x_i | pa_i) \quad \text{II.11}$$

En utilisant ce produit, toutes les requêtes probabilistes peuvent être trouvées de façon cohérente en utilisant le calcul de probabilité. Il existe un certain nombre d'algorithmes pour les calculs probabilistes dans les réseaux bayésiens. Les premiers algorithmes utilisaient l'architecture de passage des messages et ils étaient limités aux arbres (Pearl 1982) [56], (Kim 1983) [57]. Dans ces algorithmes, chaque variable a été assignée à un processeur simple et a permis de passer des messages asynchrones avec ses voisins jusqu'à ce que l'équilibre soit accompli. Certaines techniques ont été développées pour étendre cette propagation aux réseaux généraux à partir des années 1990. Deux des méthodes les plus populaires sont la méthode de Lauritzen et Spiegelhalter de la propagation des arbres de jointure (Lauritzen 1988) [58] et la méthode de conditionnement en boucle, qui est expliquée dans (Jensen 1996) [54], (Pearl 1988) [51]). Des méthodes d'apprentissage ont également été proposées pour la mise à jour systématique des probabilités conditionnelles $P(X_i | pa_i)$, ainsi que la structure du réseau afin de faire correspondre les données empiriques (Cooper 1990) [59]. Nous explorerons quelques questions sur la relation entre les réseaux bayésiens et la fonctionnalité d'un cerveau humain comme notre dernier sujet dans les réseaux bayésiens.

II.5.3 Les réseaux bayésiens et la fonctionnalité d'un cerveau humain

Une architecture comme le réseau bayésien existe-t-elle n'importe où dans le cerveau humain? Si non, comment le cerveau humain accomplit-il ces fonctions cognitives dans lesquelles les réseaux bayésiens excellent ? Pearl répond à ces questions dans les phrases suivantes: «Rien qui ressemble à des réseaux bayésiens réside en fait de façon permanente dans le cerveau. Au lieu de cela, des structures fragmentées d'organisations causales sont constamment assemblées à la volée, au besoin, à partir d'un stock de blocs fonctionnels » (Pearl 1997) [49].

Chaque bloc de construction est concentré sur la réalisation d'un contexte étroit d'expérience et est vraisemblablement matérialisé dans une structure d'un réseau de neurones. Par exemple, un réseau comme sur la figure II.1 peut être assemblé à partir de plusieurs réseaux de neurones où chacun est spécialisé dans une variable. Ces réseaux spécialisés devront être stockés dans une bibliothèque mentale permanente, à partir de laquelle ils seront sélectionnés et assemblés en une structure de réseau. Cela n'est possible que lorsqu'un problème spécifique se

pose, par exemple, pour déterminer si un arroseur peut expliquer pourquoi l'herbe de M. Holmes était mouillée au milieu d'une saison sèche. Par conséquent, les réseaux bayésiens sont particulièrement bénéfiques dans l'étude des fonctions cognitives supérieures, où l'organisation et la supervision de grandes assemblées de réseaux de neurones spécialisés est un problème important. Comme nous l'avons dit plus haut, les réseaux bayésiens font bien des raisonnements humains, non pas parce que la structure des réseaux ressemble à la structure biologique d'un cerveau humain, mais parce que le raisonnement des réseaux bayésiens ressemble à la façon dont les humains raisonnent. La ressemblance est plus psychologique que biologique.

II.6 Applications des réseaux bayésiens

Les RB possèdent plusieurs avantages qui facilitent leur utilisation pour traiter les problèmes d'inférence, de classification et de prise de décision. Les RB sont particulièrement utiles pour traiter les données manquantes (Uusitalo 2007) [60] et pourraient faire de bonnes prédictions même avec de petites tailles de données (Kontkanen et al. 1997) [61]. Cela les rend tout à fait adaptés à l'analyse avec des données limitées. Les RB peuvent également intégrer facilement des connaissances provenant de différentes sources, par exemple, des connaissances spécialisées et des données mesurées. Les RB utilisés pour enquêter sur la cause d'un accident, comme un effondrement de tunnel. Ils peuvent également être utilisés pour «substituer à la fois les arbres de défaillance et les arbres d'événements dans l'analyse des arbres logiques» et «fournir un bon outil pour l'analyse de la décision» (Sousa et Einstein, 2012) [62].

Bien que les réseaux bayésiens soient de plus en plus appliqués dans divers domaines tels que la science de l'environnement (Uusitalo 2007 [60], Aguilera et al., 2011 [63]), écologie (Landuyt et al., 2013) [64], la gestion des ressources en eau (Batchelor et Cain 1999) [65], et l'agriculture (Cain et al., 2003) [66], quelques applications en ingénierie géotechnique : Bayraktarli (2006) [67], analyse de la liquéfaction des sols sur la base des RB ; Huang et al. (2012) [68] ont développé un modèle de réseau bayésien pour caractériser l'incertitude des modèles d'évaluation de la liquéfaction ; Schubert et al. (2012) [69] ont utilisés les RB pour évaluer les risques liés à la circulation dans les tunnels routiers ; Sousa et Einstein (2012) [62] ont présenté un cadre d'aide à la décision basé sur les RB pour évaluer les risques dans la construction des tunnels ; Zhang et al. (2013) [70] ont élaboré un modèle RB pour prédire le règlement au sol dans la construction de tunnels blindés ; et Wu et al. (2015) [71] ont élaboré un modèle de réseau bayésien dynamique (RBD) pour prévoir les règlements sur les chaussées

induites par les tunnels dans le temps et fournir des lignes directrices pour l'analyse dynamique de sûreté des dommages causés par la chaussée dans le temps.

L'analyse des risques est une technique permettant d'identifier, de caractériser, de quantifier et d'évaluer l'occurrence d'un événement critique. La quantification du risque comprend l'estimation de la probabilité (p. Ex., Les fréquences) et les conséquences de l'occurrence d'un danger. L'estimation de la probabilité d'apparition d'un danger dépend grandement de la fiabilité des composants du système ; de l'interaction des composants prenant le système dans son ensemble et des interactions homme-système. L'évaluation des risques nécessite une recherche systématique de scénarios accidentels, y compris les taux de défaillance de la composante (par exemple les barrières de sécurité) ainsi que le comportement des opérateurs (facteur humain) dans un environnement en évolution. En outre, dans ces types d'analyses, les événements de faible probabilité et les dépendances entre les variables doivent être pris en compte. L'objectif de ces analyses est de fournir les éléments qui vont aider à la prise de décision en termes d'évolution de la conception, d'exploitation, de préparation et de gestion des risques (Modarres et al., 1999) [72].

Depuis 2001, L'approche bayésienne a été utilisée pour analyser les situations à risque. En particulier, les RB représentent un formalisme utile dans le domaine des analyses de risque en raison de leur capacité à modéliser des données probabilistes avec des dépendances entre les événements.

Øien (2001) [73] a proposé un cadre pour intégrer les indicateurs de risques organisationnels pour évaluer leur impact. Ce modèle pourrait être utilisé pour identifier qualitativement les causes profondes des accidents ou incidents. L'objectif est d'élaborer un modèle à des fins de contrôle des risques afin que les indicateurs de risque organisationnels soient acquis avec une certaine fréquence. Pour la quantification de modèle, l'auteur a utilisé les RB en raison de la possibilité de représentation multi-états et de la représentation intuitive de relations causales reliant les facteurs organisationnels au modèle de risque quantitatif.

Kim et Seong (2006) [74] décrivent un modèle de RB comprenant des facteurs humains pour évaluer les effets de plusieurs scénarios dans l'industrie nucléaire. Les mêmes auteurs utilisent la RB pour observer les facteurs d'influence de la fiabilité humaine (Kim et al. 2006) [75].

Des contributions complémentaires ont été apportées par Cornalba et Giudici (2004) [76] qui développent un travail dans lequel une approche bayésienne est utilisée pour élaborer un modèle statistique permettant de mesurer et, par conséquent, de prévoir les risques opérationnels auxquels un organisme bancaire est soumis. Bayraktarli. (2009) [77] a travaillé avec l'application du RB dans la gestion des risques sismiques. Les auteurs proposent que les incertitudes associées à tous les éléments de la chaîne fonctionnelle d'un tremblement de terre (du mécanisme source, les effets du site, la réponse structurelle, les évaluations des dommages et l'évaluation des conséquences) puissent être traitées de manière cohérente à l'aide d'un RB. Straub (2005) [78] démontre les avantages du RB pour l'application dans l'évaluation des risques naturels. Lee et Lee (2006) [79] proposent un cadre d'évaluation quantitative intégrant le processus d'inférence de RB à l'analyse probabiliste traditionnelle du risque afin de prendre en compte les effets prévus d'une évolution des conditions environnementales des installations d'élimination des déchets.

Dans le domaine maritime, les approches bayésiennes sont appliquées pour tenir compte des facteurs humains et organisationnels dans une analyse de risque. Norrington et al. (2007) [80] décrivent le processus d'élicitation des jugements des experts pour construire un RB. Une approche significative de RB a été développée par Trucco et al. (2008) [81] pour modéliser le système de transport maritime en tenant compte de ses différents acteurs (par exemple, armateur, chantier naval, port et régulateur) et leurs influences mutuelles. Le modèle est utilisé dans une étude de cas pour la quantification des facteurs humains et organisationnels dans l'analyse de risque effectuée au stade de la conception préliminaire des engins à grande vitesse.

Røed et al. (2008) [82] ont construit un cadre tenant compte des facteurs humains et organisationnels dans une démarche appelée logique causale hybride (LCH). Ce cadre permet au RB d'être logique et de façon probabiliste intégré dans des diagrammes de séquence d'événements et des arbres de défaillance afin d'effectuer une analyse de risque. Ensuite, ce cadre est appliqué à l'industrie pétrolière et gazière offshore. Une comparaison récente entre les RB et les méthodes de modélisation standard est faite par Duijm (2009) [83] montrant que le RB est un outil de modélisation moins restrictif par rapport à un diagramme de barrière de sécurité. Par exemple, une comparaison est faite entre le nombre d'états qui peuvent être modélisés avec un diagramme de barrière (modèle booléen) et un RB (représentation multi-états). Dans les analyses de risque, les publications récentes de Léger et al. (2009) [84] proposent une modélisation bayésienne en structurant le modèle à différents niveaux : organisation / actions / technique. L'objectif de ces travaux est d'estimer quantitativement le risque lié à l'exploitation d'un système industriel (probabilité d'occurrence de scénarios) et l'évaluation de l'impact des barrières

techniques, humaines et organisationnelles sur la performance globale du système. L'originalité de ces modèles est le formalisme d'unification basé sur RB de la connaissance fonctionnelle, dysfonctionnelle, comportementale et organisationnelle d'un système.

L'utilisation de RB se développe rapidement en raison principalement de sa capacité à représenter des systèmes complexes avec des dépendances entre variables. En particulier, pour les analyses de risque, le RB est bien adapté en raison de sa capacité à quantifier les événements à faible probabilité. Dans ce sens, Hanea et Ale (2009) [85] travaillent sur un modèle global qui prend en compte les individus, l'action des pompiers, la structure et les caractéristiques du bâtiment, et l'environnement afin d'analyser des faibles probabilités ainsi que des conséquences élevées du risque de mortalité humaine dans les incendies de construction.

Khakzad et al. (2013) [86] ont appliqué les méthodes de nœuds papillons et réseaux bayésiens dans la conduite de l'analyse quantitative des risques des opérations de forage. Il démontre enfin que la méthode du réseau bayésien offre une plus grande valeur que le modèle de nœud papillon car elle peut considérer les causes de défaillance communes et les dépendances conditionnelles ainsi que la mise à jour des probabilités et l'apprentissage séquentiel à l'aide de précurseurs d'accidents.

Abimbola et al. (2015) [87] ont étudié les problèmes de sécurité et d'exploitation de la technique de forage par pression de fond à trou constant qui est utilisée dans le forage à pression contrôlée par rapport au forage conventionnel. L'étude utilise d'abord les modèles à nœuds papillons pour dresser la carte des défis en matière de sécurité et des régimes de pression d'exploitation en utilisant une technique de perçage à pression constante à fond de trou. En raison des difficultés de modélisation des dépendances et de mise à jour de la croyance sur les données opérationnelles, les nœuds papillons sont cartographiés en réseaux bayésiens. Ces derniers sont utilisés pour une analyse profonde afin d'évaluer les éléments critiques de sécurité des techniques de forage à pression de fond-trou constant et leur régime de pression de fonctionnement sûr.

Les canalisations sous corrosion sont soumises à diverses conditions environnementales et, par conséquent, il devient difficile de construire des modèles de corrosion réalistes. Dans ce contexte Chateaufort, et Laggoune. (2016) [88], ont proposé une méthodologie bayésienne pour permettre la mise à jour des paramètres du modèle de corrosion en fonction de l'évolution des conditions environnementales. Pour l'évaluation de la fiabilité des structures dépendantes, les

réseaux bayésiens sont utilisés pour fournir une description qualitative et quantitative intéressante de l'information dans le système. La contribution qualitative réside dans la modélisation d'un système complexe, composé de pipelines dépendants, en tant que réseau bayésien. Le quantitatif réside dans l'évaluation des dépendances entre pipelines par l'utilisation d'une nouvelle méthode pour la génération de tables de probabilités conditionnelles. L'efficacité de la mise à jour bayésienne est illustrée par une application où la nouvelle fiabilité des réseaux de conduites dégradés (corrodés) est évaluée.

II.7 Etapes de modélisation d'un réseau bayésien

Il y a deux étapes principales pour la modélisation de RB (Song et al. 2012) [89] :

(1) : construire la structure du RB, soit en utilisant nos connaissances antérieures, soit en utilisant un algorithme d'apprentissage de structure à partir d'un ensemble de données de formation ;

(2) : pour déterminer la table de probabilités conditionnelles de chaque nœud dans la structure de RB, encore une fois en utilisant notre connaissance préalable ou un algorithme d'apprentissage de paramètres. Une fois que les TPC du RB sont appris, le RB peut être appliqué pour calculer les distributions de probabilité postérieures données en preuve, ce qu'on appelle l'inférence probabiliste ou la mise à jour des croyances (Korb et Nicholson, 2004) [90].

II.8 Conclusion

Nous avons expliqué en détail les réseaux causaux, les réseaux bayésiens et leurs applications dans ce chapitre. Nous avons également donné un contexte théorique dans le calcul bayésien et le raisonnement sous incertitude.

L'approche bayésienne est envisagée par rapport à d'autres techniques citées dans le chapitre I, car cet outil permet :

- De recueillir et d'intégrer les connaissances dans le modèle, qu'elles soient des données historiques ou empiriques à partir des observations, de retour d'expérience, des statistiques ou des probabilités subjectives, etc.
- De représenter les données sous un modèle graphique probabiliste clair, intuitive et facile à comprendre. Le modèle est capable d'évoluer en fonction des besoins nouveaux ou techniques du système à modéliser.

- D'évaluer, prédire, et diagnostiquer le risque. Il aide aussi à prendre les décisions en utilisant des connaissances du modèle.

Le chapitre suivant vise à fournir une idée générale sur le complexe de liquéfaction du gaz naturel (GL1/K) de Skikda, et le mettre entre les mains du lecteur une analyse bibliographique exhaustive de la littérature liée à l'évaluation des risques, les solutions de maintenance, et aussi les modèles d'aide à la décision des oléoducs et des gazoducs en phase de production.

CHAPITRE III

Les risques liés au transport du gaz par canalisations

CHAPITRE III: Les risques liés au transport du gaz par canalisations

Chapitre III : Les risques liés au transport du gaz par canalisations

III.1 Introduction

Bien que les pipelines soient considérés comme le moyen le plus sûr et le plus efficace de transport des liquides dangereux et du gaz naturel. Cependant, il existe une probabilité de défaillance avec des conséquences graves sur le plan économique, sécuritaire et environnemental.

La défaillance des pipelines de gaz et de pétrole a été largement abordée dans la littérature, néanmoins les études menées à ce jour souffrent de plusieurs limitations. Ces travaux de recherche ont soit porté sur un seul type de défaillance, par exemple : La corrosion ou des activités de tiers ; ou ils ont développé des modèles subjectifs. Les modèles physiques s'appuient sur l'analyse des données d'inspection en ligne, ce qui est très coûteux à collecter et n'existe même pas dans les premiers stades du fonctionnement d'un pipeline. En outre, certains pipelines ne sont pas raclés. Les deux modèles statistiques existants ne tiennent pas en compte des propriétés spécifiques des pipelines dans la prévision de la probabilité et des conséquences de leur défaillance. En outre, il n'existe pas de méthode structurée permettant de planifier l'inspection et la réhabilitation des canalisations. Par conséquent, l'état actuel de la pratique ne soit pas assez mature pour soutenir pleinement les exploitants de gaz et de pétrole dans le processus de prise de décision. Dans ce chapitre, nous allons essayer d'identifier et étudier les sources de défaillance et leurs effets sur les pipelines de gaz et de pétrole.

III.2 Description du réseau de transport des hydrocarbures par canalisation

D'après SONATRACH, l'Algérie exploite un réseau de transport des hydrocarbures par canalisation (Pétrole Brut, Condensat, Gaz Naturel et GPL) composé de 21 systèmes de transport par canalisation (STC) d'une longueur globale de près 19 623 km. De plus, un nouveau système de transport par canalisation du gaz naturel, dénommé STC GR5, raccordant Reggane à Hassi

R'mel est maintenant en phase de construction et ce, afin d'évacuer la future production des gisements de la région sud-ouest.

Les capacités de transport réelles, réservées et disponibles des différents systèmes de transport par canalisation déclarées pour l'année 2016 se présentent comme suit :

- La capacité totale réelle : 363,669 MTEP dont 248,412 MTEP concernant le Réseau Nord et 115,257 MTEP pour le Réseau Sud ;
- La capacité totale réservée : 235,989 MTEP soit 65% de la capacité réelle ;
- La capacité totale disponible : 127,680 MTEP.

Des centres de dispatching classent parmi les installations névralgiques de SONATRACH car ils permettent de collecter, puis d'acheminer les hydrocarbures en source des zones de production vers leurs multiples destinations :

- Le Centre de Dispatching d'Hydrocarbures Liquides (CDHL) de Haoud El Hamra (Hassi Messaoud).
- Le Centre National de Dispatching Gaz (CNDG) de Hassi R'mel, qui assure la collection du gaz naturel provenant des sites de production et son acheminement par canalisation vers les centres de consommation (Sonelgaz, clients tiers et unités de Sonatrach), de transformation (complexes de liquéfaction) et d'exportation par gazoducs.

L'Algérie exporte du gaz vers l'Europe via trois lignes :

- Enrico Mattei, reliant l'Algérie à l'Italie via la Tunisie.
- Pedro Duran Farrel, reliant l'Algérie à l'Espagne via le Maroc.
- Hassi R'Mel - Béni-Saf, reliant l'Algérie à l'Espagne via le Medgaz.

La figure II.1 présente une vue schématique du réseau de pipelines. Le cycle de vie de ces projets de pipelines comprend trois phases principales, y compris la conception, la construction et l'exploitation. Les principales étapes de la construction des pipelines sont les suivantes :

1. Préparation du site
2. Cordage des tuyaux
3. Tranchage
4. Pliage

5. Soudage
6. Revêtement
7. Abaissement et remblayage
8. Essais
9. Restauration du site

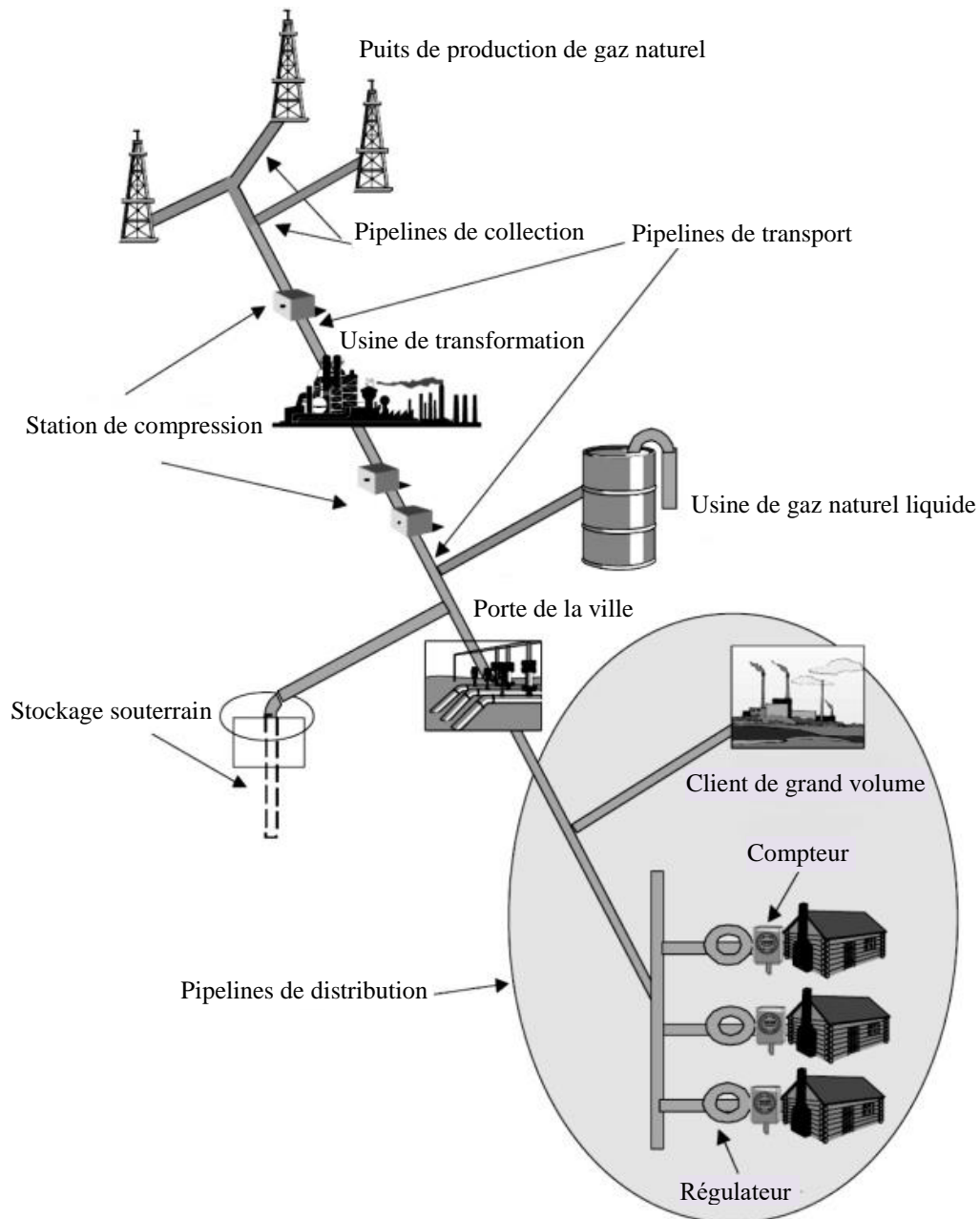


Figure III. 1 Composants du réseau de pipelines

III.3 Présentation du complexe de liquéfaction du gaz naturel de Skikda

III.3.1 Description du complexe GL1K avant la construction du nouveau train

Le complexe GL1K, l'un des principaux pôles d'hydrocarbures d'Algérie, est situé à environ quatre kilomètres à l'Est de la ville de Skikda. Il est implanté dans la zone Industrielle située dans le Golfe de Stora [91].

Dans le cadre de l'objectif stratégique de valorisation des ressources en gaz naturel principalement du gisement de HASSI R'MEL, des usines de GNL ont été construites dans le nord du pays, dont le but principal est l'exportation du GNL vers l'Europe et les USA par Méthaniers [91].

Parmi ces usines, nous citons le complexe GL1K de SKIKDA dont le chantier a débuté en mars 1969 et la production en novembre 1972. Ce complexe s'étend sur une superficie de 63 hectares et reçoit par pipe de 40 pouce et d'une longueur de 580 KM du GN du gisement de HASSI R'MEL, Sa capacité annuelle de production est de 34 95970 T de GNL et une capacité de stockage de 196000 m³ de GNL .Il emploie 1121 travailleurs permanents [91].

Le complexe comprend principalement : [91]

- 1- 02 trains de liquéfaction de GNL (U5P et L'U6P) ;
- 2- Une unité GPL pour le traitement et le stockage du propane et du butane.
- 3- Un parc de stockage et des installations d'enlèvements conséquents comprenant :
 - 03 Bacs de Stockage de GNL d'une capacité totale de 200 000 m³ ;
 - 02 Pomperies de GNL ;
 - 02 Postes de chargement de GNL.
- 4- Une unité centrale pour la production des utilités : [91]
 - Vapeur ;
 - Air instrument et Service ;
 - Azote ;
 - Eau déminéralisée et distillée ;
 - Hypochlorite de soude (Eau de Javel).

En plus du GNL le complexe produit : [91]

- L'Éthane (C₂H₆) ;
- Le propane (C₃H₈) ;
- Le butane (C₄H₁₀) ;
- Le naphta léger (C₅H₁₂).

III.3.1.1 Procédé de liquéfaction

Le GN, à sa sortie du gisement de HASSI R'MEL, est un mélange d'hydrocarbures dont la teneur en méthane est > à 80% ; mais contient également de l'éthane, du propane, du butane, du pentane et quelque traces d'hydrocarbures lourds (C₆+) [91].

On y trouve également d'autres constituants tels que Hé, N₂, CO₂ et l'H₂O, ainsi que des impuretés sous forme de poussière et des traces d'huiles [91].

L'objectif principal du complexe est de liquéfier le gaz naturel qui sera destiné à l'exportation et l'extraction des autres sous-produits qu'il contient tel que l'éthane, le propane, le butane et le pentane [91].

Chaque unité de liquéfaction se compose de (04) sections : [91]

✓ Section traitement gaz

Le traitement du gaz naturel consiste à éliminer le CO₂, H₂O, les traces des huiles et le mercure après plusieurs étapes :

- Décarbonatation : cette section est destinée à abaisser la teneur en gaz carbonique à <100 ppm par lavage avec une solution aqueuse la MEA à 15% poids.
- Déshydratation : cette section est destinée à abaisser la teneur en H₂O<1ppm.
- Démercurisation : cette section est destinée pour éliminer toute trace de mercure.

✓ Section liquéfaction

La liquéfaction met en œuvre le principe élémentaire du réfrigérateur basé sur la compression, le refroidissement, puis la détente d'un fluide pur.

Dans une unité de GNL, la section liquéfaction est constituée d'échangeurs cryogéniques (à plaques procédé PRICO pour les unités 5P et 6P) et d'une section compression.

✓ **Section fractionnement**

L'objet de cette section est d'extraire les hydrocarbures lourds du gaz traité et d'y produire par distillation de l'éthane qui est exporté au (CP1K), du bupropane qui est fractionné dans l'unité GPL , du propane et du butane produits à partir des unités 5 et 6 puis stockés dans l'unité GPL, de la gazoline qui est transférée à la raffinerie de Skikda ou sert à fabriquer l'iso pentane (composant du cycle de réfrigération).

Les colonnes de fractionnement dans les unités sont :

- Déméthaniseur ;
- Dééthaniseur ;
- Débuthaniseur ;
- La colonne de séparateur C3/C4.

✓ **Section chaudière**

La chaudière est conçue pour transformer l'eau en vapeur surchauffée à une pression et une température bien déterminées de (480C° et 67 bar) dont 80% de la quantité sert à entraîner le turbocompresseur de cycle. Le reste est utilisé dans les auxiliaires de la chaudière même (turbo pompes alimentaires et turbo ventilateur), le compresseur de fuel gaz (pour les unités 5 et 6) la section fractionnement (rebouilleurs) et la section traitement gaz.

III.3.2 Description du nouveau train

La Société nationale pour la recherche, la production, le transport et la commercialisation des hydrocarbures (Sonatrach) a prévu la construction d'un nouveau train GNL dans les limites géographiques de l'actuel complexe Skikda GL1K. Le nouveau train GNL remplace les trois trains de liquéfaction, détruits en 2004 par un incendie et une explosion, dont la capacité de production pouvant atteindre 4.5 million de tonnes métriques par an. Le projet consiste en particulier en ce qui suit : [92]

- Construction d'un nouveau train GNL intégré dans le complexe GL1.K existant ;
- Installation d'un nouveau réservoir de stockage de GNL, d'un réservoir de stockage de propane, d'un nouveau réservoir de stockage de butane et d'une sphère de stockage de gasoil (le tout intégré dans le complexe GL1.K existant) ;
- Réalisation des modifications nécessaires pour produire du propane et du butane dans le train 10 afin de remplacer la production Bupro actuelle ;

- Désaffectation, démontage, dépôts, stockage et enlèvement des deux réservoirs de stockage GNL existants du Pôle 1 du complexe GL1.K ;
- Modification des réseaux-torches existants.

Aujourd'hui, la grande majorité des usines de liquéfaction dans le monde utilisent le procédé APCI (Air Product and Chemicals Incorporation). Le nouveau train GNL utilise le procédé de liquéfaction APCI, qui comprend principalement de :

- Une boucle de réfrigération (pré refroidissement) au propane qui sert à refroidir environ 2/3 du réfrigérant principal et Pré refroidir le gaz naturel traité avant leur entrée dans l'échangeur principal cryogénique ;
- Une boucle de réfrigération au réfrigérant mixte (MR). Son rôle est de refroidir et liquéfier le gaz naturel dans l'échangeur principal cryogénique ;
- Une boucle externe de réfrigération au propane, qui sert à pré refroidir environ 1/3 du réfrigérant principal et assurer la réfrigération pour les échangeurs de l'unité de fractionnement ;
- Un échangeur principal de type bobiné pour la liquéfaction. Cet échangeur est constitué d'une calandre en aluminium et de plusieurs faisceaux de tubes en aluminium enroulés autour d'un noyau central (mandrin).

III.3.2.1 Description du procédé

Le nouveau projet méga train de liquéfaction du gaz naturel GL2K de Skikda porte sur les sections ci-dessous : [92]

- Train GNL ;
- Unité de fractionnement ;
- Infrastructures hors site comprenant : stockage GNL, le propane, le butane et l'essence ;
- Production d'électricité, traitement d'eau, réseau-torche et système d'eau incendie ;
- Sous-station électrique, chambre d'instrument de terrain, bâtiment pour la commande à vitesse variable, bâtiment de commande résistant aux explosions et bâtiment pour le laboratoire.

Le Nouveau Train de GNL n'utilise pas d'eau de mer (sauf pour le réseau incendie). Il n'utilise pas de la vapeur. Les échangeurs (rebouilleurs et réchauffeurs) utilisent de l'huile

comme fluide de chauffage. Cette huile est elle-même chauffée par les gaz d'échappement de la turbine d'entraînement du compresseur principal de propane, ainsi par un four [92].

III.3.2.2 Conditionnement du gaz d'alimentation et système de compression

La charge en gaz naturel pour le complexe arrive par gazoduc des champs de Hassi R'Mel. La zone de conditionnement de l'alimentation de l'usine est conçue pour supprimer les contaminants solides et liquides ; pour mesurer le gaz d'alimentation et pour mettre le gaz à la pression requise par l'usine de traitement GNL en aval [92].

Une prise de gaz d'alimentation (en amont de séparateur pour le compresseur de gaz d'alimentation) permet de répondre à la demande totale de gaz combustible de l'unité GNL [92].

III.3.2.3 Enlèvement du gaz acide (décarbonatation)

Une unité d'enlèvement du gaz acide (AGRU) est prévue pour retirer le CO₂ de l'alimentation en gaz brut, placé en aval de l'unité de conditionnement. Ce processus sera effectué via absorption chimique dans un solvant pauvre «une solution aqueuse de diéthanolamine méthylique activé (aMDEA) ». L'eau condensée entraînant les vapeurs d'amine seront récupérés dans l'unité de séchage et renvoyés vers le ballon de reflux de régénérateur de solvant [92].

III.3.2.4 Séchage

L'unité de séchage ; située en aval de l'AGRU ; sert à enlever l'eau du gaz d'alimentation afin d'éviter le gel d'eau dans les sections cryogéniques de l'unité de liquéfaction [92].

Le gaz d'alimentation des sécheurs subira un pré refroidissement pour réduire la teneur en eau qui sera éliminée au niveau d'un séparateur. Ceci réduit la charge sur les sécheurs à tamis moléculaire [92].

III.3.2.5 Unité d'enlèvement de mercure

Le gaz sec traité en provenance des déshydrateurs est filtré avant d'être envoyé à l'unité d'enlèvement de mercure [92].

Le gaz de d'alimentation passe dans l'absorbeur de mercure qui contient un lit de charbon actif imprégné de soufre, ce qui réduit la teneur en mercure du gaz [92].

III.3.2.6 Liquéfaction du gaz naturel

Le flux de méthane refroidi depuis le MCHE, une combinaison de vapeur de distillat de tête de la tour de lavage, de distillat de tête du déméthaniseur et de réinjection du GPL, est le principal composant du GNL et il est envoyé vers le MCHE pour la liquéfaction [92].

Le flux GNL qui quitte le MCHE traverse le détendeur de GNL où la pression est réduite. Le produit GNL est ensuite envoyé vers le ballon de détente à hélium GNL. Depuis le ballon de détente à hélium/GNL, le produit GNL liquide est envoyé d'abord dans le rebouilleur du rectificateur d'azote où la majorité de l'azote du GNL est retirée. Le GNL s'écoule ensuite en bas de rectificateur d'azote dans l'aspiration des pompes GNL qui envoie le GNL vers le nouveau réservoir de stockage [92].

III.3.2.7 Détenteurs

Deux détenteurs liquides sont installés sur le courant du produit GNL et MR lourd qui quitte le MCHE. Cette unité produit l'électricité qui sera associée à l'alimentation électrique externe et alimentera les circuits de distribution locaux pour le nouveau train GNL [92].

III.3.2.8 Extraction d'hélium

Le GNL du haut du MCHE passe au travers du détendeur liquide et est détendu brusquement dans le ballon de détente d'hélium/GNL où le courant GNL et le courant de vapeur riche en hélium sont séparés. Le courant riche en hélium est envoyé vers une nouvelle usine à hélium où ce dernier (et un peu d'azote) est extrait et liquéfié [92].

III.3.2.9 Fractionnement

L'unité de fractionnement retire les hydrocarbures plus lourds du gaz d'alimentation qui auront un impact sur les caractéristiques du produit GNL et qui présenteraient un risque de congélation dans l'échangeur de chaleur cryogénique principal (MCHÉ) [92].

L'unité de fractionnement comprend les colonnes de distillation suivantes : [92]

- Déméthaniseur ;
- Dééthaniseur ;
- Dépropaniseur ;
- Débutaniseur ;

- Déisopentaneur.

Après le traitement, le gaz est pré refroidi dans des condenseurs à propane (BP, MP, HP), et envoyé vers la colonne de lavage, là où les hydrocarbures lourds C2+ sont retirés du gaz naturel d'alimentation [92].

Les fonds de tour de lavage sont envoyés vers l'unité de fractionnement pour produire l'éthane, le propane, le butane, l'appoint de réfrigérant, la réinjection et le produit requis. Le condensat (ou essence naturelle) est envoyé en tant que produit [92].

III.3.2.10 Réinjection du GPL

Le butane sortant du Débutaneur est refroidi puis mélangé avec l'éthane et le propane issus de l'unité de fractionnement pour être réinjecter dans le circuit GNT dans le MCHE [92].

III.3.2.11 Stockage du GNL, du gaz de transfert et des évaporats

- Un bac de stockage de GNL de 150 000 m³. Il est du type confinement intégral avec une structure extérieure en béton armé précontraint à toit suspendu et une cuve interne en acier à 9% de nickel ;
- Les gaz d'évaporation des bacs (boil off) et de retour des méthaniers durant le chargement sont repris par des compresseurs et envoyés dans le réseau Fuel Gas et/ou recyclés à l'entrée de l'unité de liquéfaction du Nouveau Train de GNL ;
- Un bac de stockage de propane de capacité totale de 66 000 m³ (type confinement intégral) ;
- Un bac de stockage de butane de capacité totale de 66 000 m³ (type confinement intégral) ;
- Une unité de réfrigération de GPL (propane et butane) [92].

Cette unité reçoit : [92]

- Les gaz d'évaporation des bacs de propane et de butane du Nouveau Train. Ce boil off est liquéfié puis renvoyé au stockage vers le Nouveau Train ;
- Le retour gaz des navires GPL durant les chargements. Ce boil off est liquéfié puis renvoyé au stockage au Nouveau Train ;
- Le butane et le propane chauds venant de la Raffinerie de Skikda (RA-1/K). Ces produits sont sous-refroidis puis renvoyés au stockage dans les bacs du Nouveau Train de GNL ;

- Une sphère de stockage de gazoline de capacité totale de 3760 m³.

III.3.2.12 Les utilités

Ces installations fournissent les utilités nécessaires au fonctionnement du Nouveau Train de GNL [92].

- L'énergie électrique :
 - 5 Diesel Générateur d'une puissance unitaire de 1,8 MW.

Ces équipements servent à fournir l'énergie électrique nécessaire pour le démarrage ainsi que l'arrêt sécurisé des installations.

- 5 turbos générateurs (turbines à gaz entraînant des alternateurs) d'une puissance unitaire de 25 MW.

Ces équipements servent à fournir l'énergie électrique pour tous les consommateurs du Nouveau Train de GNL et, après raccordement, aux installations existantes (GL1K).

- 6 sous stations pour la distribution électrique.
- La production d'air instrument et d'air service comprenant :
 - 3 compresseurs d'une capacité unitaire de 3300 Nm³/heure, munis d'une batterie de sècheurs et de ballons de recette associés.

Cette unité produit de l'air instrument sec pour les besoins de l'instrumentation (vannes, positionneurs, etc.) ainsi que de l'air service non séché pour les besoins utilitaires des installations (nettoyage par exemple).

- La production d'eau potable à partir du réseau d'eau industrielle (de barrage) fournie par le complexe GL1K. Cette eau est traitée dans un package spécial pour être amenée aux conditions sanitaires exigées avant sa mise à la consommation ;

NB : Le reste des utilités est fourni par le complexe GL1K existant

- L'azote qui sera utilisé durant les opérations de mise sous atmosphère inerte des installations lors des opérations de maintenance ou de préparation de démarrage ;
- L'eau déminéralisée est utilisée pour les circuits de réfrigération de l'huile des machines tournantes. En plus dans la préparation et le maintien de la concentration de la solution MDEA pour une décarbonatation du gaz naturel [92].

III.3.2.13 Circuit du gaz combustible

Le combustible (Fuel Gaz) qui alimente les turbines à gaz des générateurs électriques et des compresseurs du train de liquéfaction a pour origine : [92]

- Le ballon de flash GNL en fin de liquéfaction ;
- Un appoint de gaz naturel ;
- Le retour de Fuel Gaz de l'usine HELISON mitoyenne.

III.3.2.14 Le système torche et brulot

- Une torche recevant les effluents gazeux des unités du Nouveau Train de GNL et du complexe existant. La hauteur de cette torche est de 150 m. Elle est montée sur un seul derrick comprenant 3 futs (2 pour le Nouveau Train : torche chaude/torche froide et 1 pour les unités existantes de GL1K) ;
- Une torche basse pression (torche confinée) recevant le torchage de boil off du nouveau Train de GNL et du complexe GL1K existant ;
- Un brûlot recevant les liquides torchés à partir du Nouveau Train de GNL et du complexe existant [92].

III.4 Modèles d'aide à la décision axés sur les risques liés aux pipelines

Il y a eu un effort considérable dans les études précédentes pour analyser et évaluer les risques des oléoducs et des gazoducs et développer des systèmes d'aide à la décision basés sur le risque pour les canalisations de pétrole et de gaz (Dey 2003 [93], Dey 2004 [94], Dey et al. 2004 [95], Han et Weng 2010 [96], Han et Weng 2011 [97]).

Dey (2003) [93] a évalué le risque de défaillance de différents segments d'un pipeline à travers le pays et a élaboré des stratégies pour la sélection des techniques d'inspection pour ces pipelines.

Le système de soutien à la prise de décision axé sur les risques a été développé par Dey (2004) [94] en utilisant la technique du processus analytique hiérarchique (AHP). Ce modèle a appliqué l'opinion d'experts pour obtenir le poids des variables qui ont été identifiées pour contribuer à la défaillance des pipelines. Les variables ont été catégorisées comme des facteurs de risque qui comprenaient la corrosion externe et interne, la construction et les défauts matériels, ainsi que des actes de Dieu.

Plus tard, Dey et al. (2004) [95] ont élaboré un modèle de maintenance axé sur les risques pour les pipelines offshore. Après avoir introduit des boucles de vraisemblance et de conséquence des risques, ils ont obtenu l'opinion d'experts pour calculer les poids relatifs de chaque facteur des boucles appliquant le AHP. Ils ont tenu compte des valeurs d'effet de 1 à 10 pour évaluer chaque facteur. Le modèle a calculé le score de risque de chaque pipeline en additionnant les valeurs d'effet multipliées par les pondérations associées des facteurs. Enfin, l'un des résultats a été la hiérarchisation des actifs d'un réseau de pipelines. La plupart des facteurs tel que la corrosion ont été évalués subjectivement ; bien que la recherche ait essayé de minimiser la subjectivité du processus décisionnel dans ce problème. Le modèle ne reconnaît pas la gravité des différents risques de défaillance. Par conséquent, des outils d'inspection ont été proposés au moyen d'un processus axé sur l'expérience qui reposait sur un ensemble de facteurs primaires. Ainsi, la recherche n'a pas développé un modèle complet et a eu besoin de l'expertise pour analyser et proposer la meilleure technique.

Une méthode quantitative a été proposée par Han et Weng (2010) [96] pour évaluer les risques individuels des réseaux de gazoducs. Cette méthode combine la probabilité de défaillance et ses conséquences internes et externes. Les effets externes comprenaient les effets individuels et collectifs tandis que les effets internes évaluaient les conséquences monétaires. Le modèle a appliqué un taux global de défaillance pour calculer la probabilité de défaillance et il a multiplié par une fonction de variables. Ensuite, les pipelines ont été classés en canalisations externes et internes. Pour le premier groupe, les conséquences individuelles et collectives ont été calculées. Cette partie du modèle a porté sur les conséquences liées à la sécurité et les dommages considérables d'un défaut sur les gazoducs. Le coefficient de la pression du pipeline avec la perte économique attendue a été multiplié par la pression du nœud qui était vulnérable à ne pas calculer les conséquences économiques. Le taux de défaillance était un taux moyen d'incidents qui a été calculé sur la base des données historiques qui ont été enregistrées à partir des données historiques sur les pannes du réseau européen de gazoducs (EGIG 1999) [98]. Le taux de défaillance de tous les pipelines a été considéré comme égal à moins que le facteur de correction ait été appliqué. Cependant, aucune fonction n'a été développée pour calculer ce facteur.

Han et Weng (2011) [97] ont développé un modèle pour comparer le risque de défaillance des gazoducs urbains dans un réseau. Ce modèle a examiné les causes des défaillances de ces pipelines et calculé leur poids sur la base des données historiques. La fréquence des défaillances a été obtenue pour calculer le poids de l'importance des causes de défaillance en appliquant la théorie de l'ingénierie de fiabilité. Ensuite, la probabilité de se

produire de chaque cause de défaillance a été calculée et multipliée par son poids connexe. La méthode a été mise en œuvre sur deux pipelines et a été comparée avec les résultats d'une méthode quantitative proposée par Han et Weng (2010) [96] pour prouver la validité du modèle développé.

III.5 Les sources de défaillance des pipelines

La première étape de l'évaluation des risques des infrastructures est d'identifier les risques associés à leur défaillance (Infraguide 2006 [99], DNV 2009 [100] et 2010 [101]). Il existe différentes classifications des risques d'infrastructure. Les sources de défaillances et de défauts qui ont entraîné des défaillances des oléoducs et des gazoducs ont été utilisés pour regrouper les risques d'échec (Muhlbauer 2004 [102], Yuhua et Datao 2005 [103], Dawotola et al. 2009 [104] et Shahriar et al. 2012 [105]). Cette section détaille comment les travaux antérieurs ont catégorisé les défaillances des oléoducs et des gazoducs.

Muhlbauer (2004) [102] a défini le risque des pipelines de gaz et de pétrole comme la perte d'intégrité et de produit. Il a également étendu la définition du risque à la défaillance de l'exécution des fonctions prévues par blocage, contamination ou panne de l'équipement. Il a été mentionné que les fuites dans la plupart des conduites urbaines telles que l'eau, les égouts et la distribution de gaz urbain peuvent tolérer une certaine quantité de fuite et ne seraient pas considérées comme ayant échoué. Toutefois, le cas était différent pour les pipelines de transport et toute quantité de fuite était définie comme une défaillance. Les pannes provoquent des interruptions dans le fonctionnement des canalisations de transport. Cette recherche a classé les défaillances du point de vue des sources en quatre catégories : tierce partie, corrosion, conception et opérations incorrectes. Parvizedghy et Zayed (2013) [106] ont classé les risques des oléoducs et des gazoducs en fonction de leurs sources de défaillance. Les défaillances ont été reconnues en raison des sources physiques, externes ou opérationnelles. Bien qu'il puisse y avoir une catégorisation différente des défaillances des oléoducs et des gazoducs ; la plupart des facteurs de risque ou des types de défaillance identifiés sont semblables. Le tableau III.1 présente les types des défaillances identifiés par chaque étude. L'identification reposait sur la fréquence des défaillances des oléoducs et des gazoducs par rapport à leurs sources.

Tableau III. 1 Types de défaillance dans six sources différentes

Types de défaillance	Sources					
	Shahriar et al. 2012 [105]	Dawotola et al. 2009 [104]	Yuhua et Datao 2005 [103]	Muhlbauer 2004 [102]	PHMSA _a 2014 [107]	EGIG 2004 [108]
Corrosion externe	*	*	*	*	*	*
Corrosion interne	*	*	*	*	*	*
Défauts de construction et de matériel	*	*	*	*	*	*
Opération incorrecte	*	*	*	*	*	*
Mauvais design	*	*	*	*	/	/
Tierce partie	*	/	*	*	/	/
Risques naturels	*	/	*	*	*	*

III.6 Evaluation de la probabilité de défaillance des pipelines

La probabilité de défaillance est l'un des paramètres requis pour évaluer le risque de défaillance dans les infrastructures. Différentes lignes directrices ont tenté de fournir une définition de la probabilité de défaillance et une échelle d'évaluation pour les infrastructures (Infraguide 2006 [99] et DNV 2010 [101]). Infraguide (2006) [99] a défini la probabilité comme la fréquence d'apparition d'un danger. L'étude a proposé le tableau III.2 pour évaluer la probabilité de défaillance des infrastructures. La probabilité de l'évaluation de la défaillance des oléoducs et des gazoducs a fait l'objet de plusieurs recherches. L'échelle de probabilité de défaillance doit être adaptée à la nature du type d'infrastructure. Certains d'entre eux sont plus dangereux pour l'environnement et l'être humain. DNV (2009) [100] a développé une échelle de probabilité de défaillance pour les gazoducs offshore. Le tableau III.3 présente les catégories d'évaluation des probabilités et leur description.

Tableau III. 2 Échelle d'évaluation des probabilités (Infraguide 2006) [99]

Niveau de probabilité		Vraisemblance
10	Survient plus de 4 fois au cours des 2 à 5 prochaines années	Fréquent
8	Se produira 2 à 4 fois au cours des 2 à 5 prochaines années Probables	Probable
6	Survient une fois au cours des 2 à 5 prochaines années	Occasionnel
3	Peut se produire une fois au cours des 2 à 5 prochaines années Rarement	Rare
1	Improbable de se produire au cours des 2 à 5 prochaines années	Improbable

Tableau III. 3 Échelle d'évaluation des probabilités de défaillance (DNV 2010) [101]

Catégorie	Fréquence annuelle	Description
1	$< 10^{-5}$	Si basse fréquence cet événement considéré négligeable.
2	10^{-5} à 10^{-4}	Événement rarement prévu.
3	10^{-4} à 10^{-3}	Événements individuellement pas prévus de se produire, mais lorsqu'ils sont résumés sur un grand nombre de pipelines ont la crédibilité de se produire une fois par an.
4	10^{-3} à 10^{-2}	On peut s'attendre à ce que l'événement se produise pendant la durée de vie du pipeline. (Typiquement 100 ans)
5	$> 10^{-2}$	L'événement individuel peut être attendu plus d'une fois pendant la durée de vie.

Les données de l'inspection en ligne ont été largement utilisées par les chercheurs précédents pour élaborer un modèle d'estimation de la probabilité de défaillance (Caleyo et al. 2009 [109], Sinha et Pandey 2002 [110], Ahammed 1998 [111]).

Caleyo et al. (2009) [109] ont développé des fonctions de distribution de probabilité de la profondeur de corrosion et du taux de croissance en appliquant la simulation de Monte Carlo. Différentes courbes ont été proposées pour les pipelines souterrains en tenant compte des propriétés des différents types de sols.

Sinha (2002) [110] et Ahammed (1998) [111] ont développé des modèles probabilistes en raison des incertitudes des paramètres du pipeline. Les deux ont obtenu des données des outils d'inspection en ligne pour prédire la probabilité de défaillance des pipelines de pétrole et de gaz sous la corrosion. Ces outils ont été utilisés pour recueillir des données sur l'état des oléoducs et des gazoducs. Les modèles nécessitaient des données sur la profondeur et la longueur des défauts à partir des outils d'inspection en ligne.

Sinha et Pandey (2002) [110] ont appliqué les réseaux de neurones artificiels pour développer un modèle pour prédire la probabilité de défaillance des oléoducs et des gazoducs. Ce modèle a utilisé la perte de métal pour prévoir la pression d'éclatement de tels pipelines sur la base du modèle développé par Kiefner et al. (1973) [112]. La pression estimée a été utilisée pour prévoir la résistance résiduelle des pipelines.

Noor et al. (2011) [113] ont proposé une méthode probabiliste pour prévoir la résistance résiduelle des pipelines offshore obtenant des données des outils d'inspection en ligne. Cette méthode a été développée sur la base des règles d'évaluation de la pratique recommandée de DNV pour les pipelines corrodés (Veritas 2010) [101] en tenant compte de l'écart type des outils d'inspection pour déterminer la taille des défauts.

Les recherches qualitatives sur le modèle d'évaluation de la probabilité de défaillance ont permis d'appliquer l'opinion d'un expert pour élaborer un modèle d'évaluation de la probabilité de défaillance (Al-Khalil et al. 2005 [114], Dawotola et al. 2009 [104], Dey 2003 [93] et Dey 2004 [94]). Al-Khalil et al. (2005) [114]), a classé un groupe de pipelines à travers le pays appliquant le processus de hiérarchie analytique (AHP). Ils ont classé les risques de défaillance dans sept groupes: la corrosion, les défauts du milieu du mur, les interférences externes, les défauts structurels, les problèmes de fonctionnement et la perte du support au sol. Ensuite, les experts ont évalué la probabilité et le coût de défaillance de chaque pipeline par rapport aux facteurs de risque identifiés pour calculer le coût global prévu de défaillance pour chaque pipeline. Ces scores ont été utilisés plus tard pour donner la priorité aux pipelines par rapport au budget. Cette recherche a tenté d'offrir une «approche systématique axée sur le risque» pour hiérarchiser un groupe de pipelines même s'il manquait d'objectivité et n'a pas vraiment développé un modèle complet. Zeng et Ma (2009) [115] ont développé un modèle de risque pour les pipelines souterrains. Le modèle a appliqué deux séries de variables générales et d'inspection. Puis, il les a corrélées avec six principaux types de défaillance : la forme, la couture, la profondeur, les défaillances structurelles, l'alignement des tuyaux et le blocage. Ensuite, il a tenu compte des conséquences de défaillance, du coût, de la performance, de l'interruption, de la sécurité et a finalement proposé une méthode de max-averge pour maximiser l'effet des conséquences graves dans l'évaluation du niveau de risque. Comme l'auteur l'a décrit, ce modèle n'a pas développé l'indice de notation pour calculer la probabilité de défaillance. Elle ne propose qu'un tableau ordinal des échelles pour différentes conséquences; L'absence d'objectivité était évidente dans ce modèle.

Dey (2003) [93] a évalué le risque de défaillance de divers segments d'un gazoduc de plusieurs pays. La probabilité de défaillance des segments d'un pipeline a été évaluée sur la base du jugement des experts comparant diverses sources de défaillance dans chaque segment par rapport aux autres sources. Les poids calculés pour chaque source de défaillance ont été considérés comme la probabilité de défaillance pour chaque segment. Ces poids ont ensuite été utilisés pour hiérarchiser le segment différent à inspecter. De plus, l'outil d'inspection a été sélectionné en fonction de la probabilité relative de défaillance des segments les uns par rapport aux autres.

Dey (2004) [94] a appliqué une méthode similaire pour calculer la probabilité de défaillance des oléoducs et des gazoducs. Plusieurs experts ont jugé l'importance des différentes sources de défaillance du pipeline appliquant le AHP. L'importance relative des sources de défaillance identifiées a été évaluée sur la base des poids calculés. Enfin, l'opinion des experts a été appliquée pour évaluer la probabilité de défaillance des pipelines contre chaque type de défaillance. Ce score multiplié par les poids calculés a entraîné au total de la probabilité de défaillance.

Dawotola et al. (2009) [104] ont proposé un modèle pour calculer la probabilité de défaillance de différentes causes d'incidents de pipeline. Le modèle a été conçu avec la combinaison de l'AHP et de l'arbre de défaillance. En fait, le modèle visait à classer les causes responsables des défaillances des pipelines sur la base de l'opinion des experts. Le modèle n'a pas tenu compte des propriétés des pipelines et n'a évalué que l'importance relative de chaque cause de défaillance.

Certaines des études précédentes ont utilisé les réseaux de neurones artificiels pour développer un modèle sur la probabilité de défaillance des tuyaux en raison de la corrosion ou des activités de tiers. Bersani et al. (2010) [116] ont proposé un modèle pour prédire la probabilité de défaillance en fonction des différentes causes, en appliquant les réseaux de neurones artificiels. Pour chaque cause de défaillance, un ensemble de facteurs a été proposé en tant que variables indépendantes. Des résultats préliminaires ont été présentés pour prédire les défaillances des tiers. Cependant, les résultats n'ont pas prouvé ni l'importance des facteurs proposés ni la solidité du modèle. Ren et al. (2012) [117] ont appliqué des réseaux de neurones de rétro-propagation dans un modèle pour prédire le taux de corrosion maximale des gazoducs. Les variables d'entrée comprenaient la longueur du pipeline, la différence d'élévation entre les différentes sections, l'inclinaison du tuyau et la pression. Le modèle a également considéré le

nombre de Reynolds comme un facteur important dans la prédiction de taux de corrosion de diverses sections de gazoducs. Menon (2005) [118] a défini le nombre de Reynolds comme un facteur important dans la classification du débit des gazoducs. L'étude a développé une fonction de la vitesse moyenne du gaz, du diamètre intérieur du tuyau, de la densité et de la vitesse du gaz comme paramètres d'entrée pour calculer le nombre de Reynolds.

Un effort considérable a été effectué au cours des dernières années pour modéliser la fiabilité des tuyaux soumis à la corrosion. Teixeira et al. (2008) [119] ont développé un modèle pour évaluer la fiabilité des pipelines présentant des défauts de corrosion. Le modèle a calculé la probabilité de défaillance des pipelines basée sur le calcul de leur pression d'éclatement. Il a appliqué les calculs numériques de fiabilité des tuyaux. L'analyse de sensibilité a prouvé l'importance de la profondeur de corrosion et de la pression opérationnelle interne sur la défaillance de rupture des pipelines. Le modèle a été élaboré à partir de données limitées provenant de certains essais sur le terrain. Feng et al. (2011) [120] ont développé un modèle physique pour les oléoducs et les gazoducs. Cette étude a analysé l'effet de plusieurs facteurs sur la fiabilité des pipelines. Les données ont été obtenues par «mesure sur le terrain et essais physiques et mécaniques». L'analyse de sensibilité a prouvé l'importance de l'effet de la force du rendement, de la pression interne et de l'épaisseur de paroi des pipelines. Sahraoui et al. (2013) [121] ont proposé une politique de maintenance pour les pipelines de transport d'hydrocarbure soumis à la corrosion, en tenant compte des résultats d'inspection imparfaite. Le travail de Nahal et al. (2015) [122] décrit une méthode probabiliste afin de gérer les canalisations corrodées sous une pression de service assez élevée.

La prévision de la cause de défaillance des canalisations de pétrole et de gaz a fait l'objet d'études pour de nombreux chercheurs. Bertolini et al. (2006) [123] ont élaboré un système d'aide à la décision (DSS) pour prévoir la classe de déversement dans les oléoducs et gazoducs à travers le pays. La technique de classification et de régression a été appliquée pour élaborer un arbre de décision qui visait à prévoir la cause des fuites dans ces pipelines. L'objectif de la recherche était de sélectionner l'outil d'inspection le plus approprié pour les oléoducs et les gazoducs. La technique de régression a été appliquée pour développer ce modèle. Ce dernier visait à reconnaître les pipelines avec des défaillances potentielles de tiers de ceux enclins aux défaillances des risques naturels. Le modèle utilisait des variables tels que le diamètre du tuyau, le type de service, le type d'emplacement, l'âge de défaillance, l'environnement et l'équipement utilisé pour détecter les fuites. Les données ont été recueillies auprès de Conca (Davis et al., 2010) [124] pour prévoir la cause de défaillance.

La plupart des modèles développés étaient subjectifs et dépendaient du jugement des experts (Dey et al. [95], 2004 et Dey, 2003 [93]) ou ne portaient que sur une seule source de défaillance de pipelines comme la corrosion (Liao et al, 2012 [125] ; Sinha et Pandey 2002 [110] et Ahammed 1998 [111]). Par conséquent, ils ne sont pas exhaustifs. Ils manquaient également d'objectivité dans l'estimation de diverses sources de défaillances dans les oléoducs et les gazoducs.

Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des modèles pour couvrir ces limitations. Ils ont essayé de développer des modèles qui pourraient prédire d'autres sources de défaillances en plus de la corrosion. Senouci et al. (2014) [126] a appliqué la technique de la logique floue pour élaborer un modèle afin de prédire le type de défaillance des pipelines de pétrole et de gaz et a comparé les résultats avec ceux de Senouci et al. (2013) [127]. Les résultats de la comparaison ont prouvé que le modèle développé basé sur la logique floue surpassait les modèles de régression et de réseaux de neurones artificiels par rapport à la validité du modèle. Malgré les tentatives faites pour prédire le type de défaillance de pipelines de pétrole en considérant des causes autres que la corrosion ; tout modèle n'a pas réussi d'appliquer d'autres facteurs en dehors d'elle. En d'autres termes, ils concernaient principalement les facteurs qui causent des défaillances dues à la corrosion ou à des dommages de tiers seulement. De plus, les questions importantes de «l'interdépendance» entre les relations de différents facteurs et «l'incertitude» des poids des facteurs de gravité n'ont pas été abordées simultanément. En conséquence, El-Abbasy et al. (2014a) [128] ont développé un modèle pour évaluer l'état des pipelines de pétrole et de gaz en appliquant un certain nombre de facteurs comprenant toujours la corrosion. Le modèle a appliqué le processus de réseau analytique (ANP) et la simulation Monte Carlo. L'interdépendance des facteurs a été prise en compte par le processus de réseau analytique et les décisions suggérées ont tenu compte de l'incertitude (en utilisant la simulation). La mise en œuvre du modèle sur un gazoduc offshore existant au Qatar a été couronnée de succès. Les résultats du modèle ont été comparés à l'état réel du pipeline.

Le modèle de simulation construit par El-Abbasy et al. (2014a) [128] a été considérée comme une première phase pour évaluer l'état des oléoducs et des gazoducs en mer. El-Abbasy et al. (2014b) [129] ont élaboré la deuxième phase du modèle dont l'objectif était de prévoir l'état actuel et futur des oléoducs et des gazoducs en mer. Le modèle a été élaboré à partir des données d'inspection historiques recueillies au Qatar. Le modèle développé a utilisé la technique d'analyse de régression pour prédire l'état du pipeline et comparé à l'état réel a donné un pourcentage de validité moyen supérieur à 96%. El-Abbasy et al. (2014c) [130] ont appliqué la

technique des réseaux de neurones artificiels pour développer un autre modèle avec le même objectif. Le modèle a surperformé celui de la régression par rapport aux résultats de validité. Ces modèles ont appliqué plusieurs facteurs pour prédire l'état des pipelines avec une précision considérablement élevée. Cependant, ils ne pourraient pas développer un modèle pour prédire les sources des défaillances ou leurs conséquences. De plus, les modèles conçus dans ces études dépendaient des données d'inspection en ligne, ce qui est coûteux à collecter fréquemment. Ils n'ont pas tenu compte de la spécification de l'emplacement des tuyaux dans le développement des modèles.

Shahriar et al. (2012) [105] ont élaboré un modèle complet pour évaluer le risque de défaillance des oléoducs et des gazoducs en appliquant l'analyse de nœud papillon. L'analyse de nœud papillon est une nouvelle approche qui tire parti des techniques graphiques pour analyser différents scénarios de défaillance de pipeline. Cette technique combine l'analyse d'arbre de défaillance avec l'analyse d'arbre des événements. Le modèle a utilisé l'arbre de défaillance développé par Dawotola et al. (2009) [104] et Yuhua et Datao (2005) [103] avec quelques modifications. Le diagramme de nœud papillon pour le gazoduc était centré sur la fuite de gaz du pipeline qui était l'événement le plus important pour l'arbre de défaillance. Les sources de défaillance telles que les activités de tiers, la corrosion, l'utilisation incorrecte, la conception déraisonnable et les risques géologiques étaient le premier niveau d'expansion des causes de défaillance. Dans les niveaux inférieurs, les variables qui étaient responsables de différents types de défaillance ont été identifiées et considérées comme les événements de base. L'opinion des experts a été utilisée pour évaluer la probabilité floue des événements de base.

Une échelle floue de 11 degrés a été utilisée pour évaluer la probabilité de défaillance, développée par Sadiq et al. (2004) [131]. Des fonctions d'appartenance triangulaires floues ont été appliquées pour développer l'échelle granulaire et évaluer la probabilité de défaillance. L'échelle traduit les termes linguistiques en nombres flous évaluant la probabilité de défaillance d'un niveau absolument bas à un niveau absolument élevé. La probabilité d'occurrence de l'événement supérieur a été calculée en multipliant les probabilités attribuées aux événements de base. Enfin, l'analyse de sensibilité a prouvé l'importance des défaillances d'installation et de construction. Comme nous l'avons déjà mentionné, l'expertise a été utilisée pour analyser la probabilité de défaillance des gazoducs. Cependant, il était très difficile pour les experts d'analyser l'effet de 40 événements de base sur la probabilité de défaillance ou l'événement supérieur (Shahriar et al. 2012) [105]. Les limitations du modèle peuvent être minimisées en appliquant les données historiques dans le développement du modèle.

Certains chercheurs mentionnés précédemment ont essayé d'élaborer des modèles pour prévoir la probabilité de défaillance (Shahriar et al. 2012 [105], Dawotola et al. 2009 [104], Yuhua et Datao 2005 [103], Muhlbauer 2004 [102]). Dans les tableaux III.4, III.5 et III.6, les variables qui ont été considérées lors de l'élaboration des modèles déjà mentionnés pour estimer la probabilité de défaillance et qui sont résumées pour chaque type de défaillance.

III.7 Conséquences de défaillance

Au cours des dernières décennies, un effort considérable a été fait pour modéliser les conséquences de l'échec des oléoducs et des gazoducs. Certaines des lignes directrices fournissent une échelle d'évaluation qualitative pour ce paramètre d'évaluation des risques sous divers angles. DNV (2010) [101] a examiné les conséquences des défaillances des pipelines de pétrole et de gaz quant aux risques pour la sécurité (personnels), environnementaux et économiques. Les conséquences économiques ont été à l'origine du retard de production des pipelines alors que les conséquences pour la sécurité ont été proposées pour être mesurées par rapport au personnel. Le coût de la réparation des dommages causés au gazoduc a été ignoré en évaluant les conséquences économiques car il a été jugé négligeable. La méthode proposée était basée sur le jugement des experts et était donc subjective. Le tableau III.7 présente les scores qui ont été définis à différents niveaux de conséquences pour la sécurité.

DNV (2010) [101] a défini les conséquences environnementales comme les effets de la libération du produit par rapport à l'écosystème. Par conséquent, la quantité de déversement du produit a été utilisée pour classer les conséquences environnementales d'une défaillance du pipeline, comme le montre le tableau III.8. Différents niveaux de conséquences économiques et leur retard de production attribué sont présentés au tableau III.9. La méthode développée dans cette directive est une méthode subjective et nécessite l'avis des experts qui, toutefois, ne connaissent pas ces risques des oléoducs et des gazoducs car pour la plupart des pipelines sont enfouis sous la terre ou sous la mer.

Tableau III. 4 Résumé des variables affectant la probabilité de défaillance de la corrosion

Type de défaillance	Travaux	Variables
Corrosion externe	Shahriar et al. 2012 [105]	Protection cathodique défaillante Défaillance du revêtement Corrosion du sol (haute température, faible résistance, ratio d'eau élevé, sel élevé, bactéries, faible pH, interférence électrique)
	Dawotola et al. 2009 [104]	Protection cathodique défaillante Corrosion du sol Défaillance du revêtement
	Yuhua et Datao 2005 [103]	Protection cathodique défaillante Défaillance du revêtement Corrosion du sol Anti-corrosion
	Muhlbauer 2004 [102]	Environnement souterrain Corrosivité du sol (résistivité, pH, humidité, carbonates) Corrosion mécanique (niveau de contrainte, contrainte cyclique, température, revêtement, protection cathodique, pH) Efficacité de la protection cathodique Potentiel d'interférence (courant continu et courant alternatif liés, potentiel de blindage) Revêtement (type, âge, âge d'inspection visuelle, autre âge d'inspection)
Corrosion interne	Shahriar et al. 2012 [105]	Défaillance d'un inhibiteur Défaillance du revêtement Décollement
	Dawotola et al. 2009 [104]	Défaillance d'un inhibiteur Défaillance du revêtement Décollage inter facial Milieu corrosif
	Yuhua et Datao 2005 [103]	Anti-corrosion Défaillance d'un inhibiteur Défaillance du revêtement Mauvais tuyau Milieu (avec de l'eau ou de l'acide)
	Muhlbauer 2004 [102]	Caractéristiques du débit Corrosivité du produit Caractéristiques du flux d'écoulement (solides et liés à l'eau) Préventions

Tableau III. 5 *Résumé des variables affectant la probabilité de défaillances opérationnelles*

Type de défaillance	Travaux	Variables
Défauts de construction et de matériel	Shahriar et al. 2012 [105]	Les mêmes variables que Yuhua & Datao 2005
	Yuhua et Datao 2005 [103]	Défaut de construction Défaut matériel Défaut de fonctionnement (mauvaise installation, soudure, rainure, dommages mécaniques)
	Muhlbauer 2004 [102]	Inspection Matériaux Joins Remplissage Manipulation Enrobage
Opération incorrecte	Shahriar et al. 2012 [105]	Les mêmes variables que Yuhua & Datao 2005
	Yuhua et Datao 2005 [103]	Qualité du travailleur SCADA Maintenance de l'équipement Maintenance des appareils
	Muhlbauer 2004 [102]	Procédures SCADA Test de dépistage des drogues Programme de sécurité Enquête Entraînement Prévention des erreurs mécaniques
Mauvais design	Shahriar et al. 2012 [105]	Les mêmes variables que Yuhua & Datao 2005
	Yuhua et Datao 2005 [103]	Force déraisonnable Matériel inapproprié
	Muhlbauer 2004 [102]	Facteur de sécurité (Pression de service maximale, Pression de service, résistance du matériau, charge externe, diamètre extérieur, résistance du raccord, valves, composants) Fatigue Vérifications de l'intégrité

Tableau III. 6 *Résumé des variables affectant la probabilité de défaillances externes*

Type de défaillance	Travaux	Variables
tierce partie	Shahriar et al. 2012 [105]	Les mêmes variables que Yuhua & Datao 2005
	Yuhua et Datao 2005 [103]	Les partis ignorent la signalisation Signalisation implicite Sabotage Surcharge
	Muhlbauer 2004 [102]	Profondeur minimale du revêtement (couverture du sol, type de sol, type de chaussée, bande ou treillis d'avertissement, profondeur de l'eau) Niveau d'activité (densité de population, stabilité de la zone, un appel, autres services publics enterrés, ancrage) Installations en surface (vulnérabilité, menaces telles que le trafic) Système à un appel (mandat, réponse du propriétaire, bien connu et utilisateur) Évacuation publique (méthodes telles que porte à porte, courrier, publicité, fréquence) Conditions de droit de passage (signes, marqueurs, surcroissance, sous-bois) Patrouille (fréquence de la patrouille terrestre et aérienne, efficacité de la patrouille terrestre et aérienne)
Risques naturels	Shahriar et al. 2012 [105]	Les mêmes variables que Yuhua & Datao 2005
	Yuhua et Datao 2005 [103]	Tremblement de terre Inondation Affaissement
	Muhlbauer 2004 [102]	Les mouvements de terrain (secousses sismiques, mouvements de défauts, affaissement, glissement de terrain, érosion des berges)

Tableau III. 7 *Échelle des conséquences pour la sécurité (DNV 2010) [101]*

Catégories	Description
1 (Faible)	Aucune personne n'est blessée.
2	(non utilisé)
3 (Moyen)	Blessure grave, létalité (accident de travail)
4	(non utilisé)
5 (haute)	Plus d'une fatalité (ignition de nuage de gaz)

Tableau III. 8 *Échelle des conséquences environnementales (DNV 2010) [101]*

Catégories	Description	Quantité de matière libérée
1 (Faible)	Aucun, petit ou insignifiant sur l'environnement. Soit en raison d'aucune libération de milieu interne ou seulement la libération insignifiante.	~ 0
2	Libération mineure de milieux polluants. Le milieu libéré se décompose ou se neutralise rapidement.	< 1,000 tonnes
3 (Moyen)	Libération modérée du milieu polluant. Les médias libérés utiliseront un certain temps pour se décomposer ou neutraliser, ou peuvent facilement être enlevés.	< 10,000 tonnes
4	Grande libération du milieu polluant qui peut être enlevée, ou sera après un certain temps se décomposer ou être neutralisé.	< 100,000 tonnes
5 (haute)	Grand libération du milieu hautement polluant qui ne peut pas être enlevée et utilisera longtemps pour se décomposer ou être neutralisé.	> 100,000 tonnes

Tableau III. 9 *Échelle des conséquences économiques (DNV 2010) [101]*

Catégories	Description	Délai de production / Temps d'arrêt
1 (Faible)	Effet insignifiant sur le fonctionnement, coût de réparation faible ou insignifiant	0 jour
2	La réparation peut être différée jusqu'à l'arrêt programmé, certains frais de réparation se produiront.	< 1 mois
3 (Moyen)	La défaillance provoque une perte prolongée non planifiée de l'installation ou du système et des coûts de réparation importants. La rectification nécessite un fonctionnement sous-marin non planifié avec un système de réparation pré-qualifié avant toute autre production.	1-3 mois
4	La défaillance provoque un arrêt indéfini et des coûts significatifs d'installation ou de défaillance du système. La rectification nécessite un fonctionnement sous-marin non planifié sans système de réparation pré-qualifié avant la production ultérieure. Ou Défaillances entraînant des périodes plus courtes d'arrêt des principales parties de (ou de la totalité) de la production d'hydrocarbures pour le champ.	3-12 mois
5 (haute)	Perte totale de pipeline et possiblement perte d'autres parties structurelles de la plate-forme. Grand coût de réparation y compris long temps d'arrêt de production. Ou Défaillances ayant entraîné un arrêt de la production totale d'hydrocarbures pendant une période plus longue.	1-3 années

Certains chercheurs ont essayé de développer des modèles numériques pour estimer les conséquences de défaillance des pipelines. Restrepo et al. (2009) [132] ont développé des modèles de régression logistique pour prédire les conséquences pécuniaires des défaillances des pipelines. Les modèles ont obtenu des données du bureau de la sécurité pipelinière (OPS) une section du ministère américain des transports (DOT). Les données sur les incidents des pipelines des liquides dangereux de 2002-2005 ont été obtenues pour développer ce modèle. Premièrement, la probabilité d'occurrence de conséquences non nulles a été évaluée à l'aide de modèles de régression logistique. Les modèles ont été formés en intégrant des données sur plusieurs paramètres de la base de données. Les paramètres comprenaient la partie du système impliquée dans l'accident, la localisation du pipeline (en mer ou en terre), l'occurrence dans une zone à hautes conséquences (HCA et non HCA), ainsi que les facteurs binaires représentant l'apparition d'une ignition, d'une explosion et / Ou la perte de produit. Pour les incidents de conséquences autres que zéro, d'autres modèles ont été élaborés. Les intrants de ces modèles comprenaient des caractéristiques des incidents tels que l'apparition d'une inflammation et / ou d'une explosion, la quantité de perte de produit, les spécifications de localisation (c.-à-d. en mer versus en terre et HCA versus non HCA), et la cause de l'accident. Ces modèles pourraient être utilisés pour analyser différents scénarios d'accidents sur ces pipelines. Cependant, il y avait quelques limitations dans leur application pour prédire la conséquence des défaillances. Tout d'abord, le montant de la perte de produit et la partie du système impliqué dans l'incident est très difficile à prévoir et n'est pas connu avant l'événement d'un accident. En outre, les modèles n'ont pas été validés, et leur exactitude dans la prédiction des conséquences monétaires n'a pas été testée.

Simonoff et al. (2010) [133] ont développé des modèles pour évaluer différents scénarios de défaillances de pipeline. Cette étude a permis d'obtenir des données historiques enregistrées entre 2002-2009 et 2004-2009 sur les défaillances des pipelines de transport et de distribution respectivement. Semblable à Restrepo et al. (2009) [132], cette étude a développé un modèle en deux étapes. Dans la première étape, la probabilité d'occurrence d'une conséquence de coût non nul a été évaluée à l'aide de modèles de régression logistique. Ces modèles comprenaient des variables binaires sur les caractéristiques incidentes de la défaillance des pipelines. Dans la deuxième étape, l'ampleur d'une conséquence du coût a été mesurée en appliquant des modèles de régression de moindres carrés. Ces modèles ont utilisé des variables présentant les causes des incidents et des types d'incident. Les résultats des modèles étaient les scénarios de défaillance des pipelines. L'un des scénarios était la défaillance d'un pipeline de transport terrestre à la suite

d'une corrosion interne dans un réacteur (non HCA) avec rupture. Ce scénario a été supposé ne pas être impliqué dans une inflammation ou une explosion. Le coût calculé de la défaillance était prévu dans l'intervalle de 17 093 à 281 815 dont la moyenne était de 71 093 \$. Les scénarios analysés n'ont pas tenu compte des caractéristiques du pipeline telles que le diamètre, l'épaisseur de la paroi ou son âge. De ce fait, les modèles développés dans cette étude ne peuvent pas être appliqués pour évaluer les conséquences du risque de la zone défaillante d'un pipeline spécifique.

L'arbre d'événements a été utilisé par certains des chercheurs pour modéliser les conséquences des défaillances des pipelines de pétrole et de gaz. Brito et al. (2009) [134] ont développé un arbre d'événements pour analyser les défaillances accidentelles des gazoducs. Les principaux facteurs qui ont été considérés dans le développement de cet arbre d'événements étaient le mode de rupture (rupture par rapport à la ponction), le retard dans l'allumage possible, ainsi que le degré de confinement dans l'espace du gaz libéré. Les conséquences du dégagement de produit ont été identifiées comme suit : détonation, feu de jet, explosion de nuage de vapeur confinée, feu instantané et dispersion de gaz. Une fonction additive des conséquences humaines, environnementales et financières a été considérée pour calculer les probabilités des conséquences. Chaque pipeline était divisé en sections couvrant des dizaines de mètres. La probabilité de conséquences pour chaque section a été calculée en obtenant l'opinion des experts par des jugements probabilistes. Cependant, il a été très difficile pour les experts d'estimer la distribution des probabilités des conséquences. Subséquemment, le taux moyen de défaillance du pipeline a été utilisé comme probabilité de défaillance qui a été calculée sur la base des rapports d'EGIG (2008) [135]. Cette valeur moyenne a été utilisée comme probabilité de défaillance de base dans les gazoducs égale à 0,00041 / km par an. Certains facteurs d'ajustement, y compris l'utilisation de la terre et du sol, les activités de tiers, la distance des zones résidentielles ont été utilisées. Les experts ont estimé la valeur des facteurs d'ajustement dans les différentes sections du pipeline. Par conséquent, les sections ont été classées selon leur risque de défaillance. Bien que le modèle ait bénéficié des données historiques, il était subjectif et dépendait de l'opinion des experts. En outre, les experts doivent être très expérimentés car le modèle a besoin de données détaillées sur l'estimation des facteurs d'ajustement.

Comme mentionné précédemment, Shahriar et al. (2012) [105] ont élaboré un modèle d'analyse «nœud papillon» qui a examiné les événements après défaillance des gazoducs pour estimer les conséquences de défaillance. Ce modèle a adapté l'arbre d'événements développé par Sklavounos et Rigas (2006) [136]. Les principaux facteurs qui ont été considérés dans le développement de l'arbre des événements ont été mentionnés comme le retard dans l'ignition du

gaz libéré en raison de la défaillance de la canalisation et le degré de confinement de l'espace. Les événements après un dégagement de gaz ont été identifiés comme explosion de détonation, de boule de feu, de nuage de vapeur confiné, de feu instantané et de perte matérielle. La probabilité d'occurrence de chaque événement après défaillance a été évaluée en multipliant celle de libération de gaz par celle de survenue des deux facteurs primaires (à savoir, le délai d'inflammation et le confinement dans l'espace). Le calcul a permis d'analyser la probabilité de survenue de chaque scénario de défaillance. Ensuite, les trois critères de durabilité ont été utilisés pour évaluer les conséquences sociales, environnementales et économiques des défaillances. Les conséquences sociales incluaient l'évaluation des besoins en sinistres, en réponse à la société et à l'évacuation. Les conséquences environnementales ont nécessité l'évaluation des conséquences en ce qui concerne l'air, les habitats menacés, la végétation, le sol et l'eau. Enfin, l'évaluation économique des conséquences comprenait les effets de défaillance sur l'interruption de l'offre, la réparation, la perte matérielle et les dommages aux biens et aux tiers. L'échelle floue granulaire a été appliquée pour évaluer les conséquences de chaque scénario de défaillance par l'opinion des experts (Shahriar et al. 2012) [105]. L'application de l'élocution experte a diminué l'objectivité du modèle et a rendu difficile pour les experts de juger la probabilité d'occurrence de chaque scénario et d'estimer plusieurs facteurs pour évaluer les conséquences d'une défaillance de pipeline.

III.8 Conclusion

Des efforts considérables ont été déployés pour faire face au risque et l'évaluation des défaillances de pipelines. Certains chercheurs ont essayé d'élaborer des modèles de planification des inspections basés sur le risque. Cependant, la revue de la littérature atteste que les travaux de recherche existants n'ont pas développé un modèle objectif intégré pour l'évaluation des risques de ces pipelines ni une méthode de planification globale de maintenance. La plupart des études précédentes se sont concentrées sur l'un des aspects de l'évaluation des risques de ces pipelines. Certains ont considéré l'un des types de défaillance des pipelines de pétrole et de gaz comme la corrosion. Les autres ne se sont concentrés que sur la probabilité de défaillance. Les modèles globaux existants manquaient d'objectivité ou développaient des modèles physiques. Alors que les modèles qui obtiennent l'opinion d'experts sont critiqués par la subjectivité, la mise en œuvre des modèles physiques prend du temps et coûte cher. La modélisation des conséquences des défaillances a fait l'objet de quelques autres études. De même, les modèles existants sur les conséquences de défaillance étaient soit subjectifs ; ce qui nécessitait l'avis d'experts ; soit des données nécessaires sur les événements après défaillances telle que la quantité de produit qui est

libérée dans l'environnement. Par conséquent, les modèles actuels sont limités dans leurs applications et ne peuvent pas prédire les conséquences financières des pannes de canalisations.

De plus, les modèles physiques ont obtenu des données à partir d'outils d'inspection en ligne très coûteux et impossibles à exécuter fréquemment. En outre, au début du projet ou même avant la construction, quand il y a un besoin d'un modèle pour évaluer le risque de défaillance dans ces pipelines ; aucune des études précédentes n'est utile. Certains des pipelines ne sont pas raclés et il n'est pas possible d'appliquer des outils d'inspection en ligne pour mesurer la perte de métal ou la croissance de la détérioration. Par conséquent, il existe un certain besoin d'un modèle intégré d'évaluation des risques qui applique des méthodes d'analyse statistique permettant d'obtenir les données historiques disponibles sur les propriétés des oléoducs et des gazoducs et l'environnement environnant.

Dans la revue de la littérature, plusieurs techniques puissantes ont été trouvées qui peuvent convenir à l'évaluation des risques de ces pipelines. Par exemple, il a été constaté que l'analyse par nœud papillon est une méthode graphique forte qui peut être appliquée pour l'évaluation de la probabilité de défaillance. Cette méthode serait plus efficace lorsqu'elle se combinerait à des autres méthodes analytiques. Les données historiques des défaillances des pipelines de pétrole et de gaz peuvent être utilisées pour élaborer un modèle objectif de l'évaluation de la probabilité de défaillance.

Dans le chapitre suivant, nous allons utiliser quelques approches d'analyse et de modélisation des risques liés au transport des hydrocarbures par canalisation, en particulier au niveau du complexe GNL de Skikda, qui est considéré comme le point le plus sensible de la zone industrielle. Les modèles proposés vont permettre à l'analyste de sécurité de percevoir les causes possibles de feu et explosion de pipelines ainsi que leurs conséquences.

CHAPITRE IV

Application : Etude de cas

CHAPITRE IV: Application : Etude de cas

Chapitre IV : Application : Etude de cas

IV.1 Introduction

Le pétrole et le gaz sont les principales sources d'énergie et de carburant utilisées depuis les premiers temps. La plupart des hydrocarbures sont transportés d'un endroit à un autre par des pipelines. Les pipelines existants dans le monde ont subi une détérioration due au vieillissement ; Les facteurs environnementaux agressifs, la conception et l'entretien inadéquat (Kanury 1981) [137]. Pour assurer des performances optimales, cela nécessite souvent un entretien important, la réparation et le renouvellement des pratiques voire le remplacement de certains composants. L'intégrité de ces pipelines revêt un intérêt primordial pour les sociétés pétrolières et gazières, les organismes gouvernementaux et les consommateurs en raison des conséquences négatives potentielles non seulement pour la santé publique, mais aussi pour la sécurité et les lourdes responsabilités financières en cas de défaillance du réseau.

Le feu et l'explosion des pipelines (FEP) ne peuvent jamais être totalement évités ; cependant, le risque global peut être réduit à un niveau acceptable en optant pour des stratégies de gestion des risques efficaces.

La quantification du risque de FEP est une tâche très difficile. Les systèmes de distribution des hydrocarbures comprennent de nombreux (sinon des milliers) de kilomètres de tuyaux de différentes âges et de matériaux différents avec des conditions environnementales et opérationnelles qui varient spatialement et temporellement.

L'analyse des risques est un moyen systématique et scientifique de prédire, de prévenir l'apparition des événements indésirables par la collecte et l'intégration d'informations qualitatives et quantitatives ; les causes possibles en plus des conséquences et de la probabilité d'événements indésirables. La probabilité d'un événement se réfère à sa mesure quantitative qui est exprimée soit en fréquence (taux d'événement se produit dans une unité de temps) ou probabilité (la chance de l'événement se produisant dans des conditions définies) d'occurrence.

Récemment, il y a eu de nombreux travaux qui ont été basés sur la théorie de la logique floue pour résoudre des problèmes similaires, parmi eux : les œuvres de Zhang et al. 2016 [138], qui ont utilisé la logique floue pour estimer les valeurs de probabilité pour tous les événements de base (EB) dans l'analyse des arbres de défaillance. Aqlan et Mustafa Ali. 2014 [139] ont utilisé l'analyse de nœud papillon floue (NP) pour calculer les scores de risque agrégés pour la probabilité et l'impact qui seront utilisés pour déterminer la localisation du risque dans la matrice de priorisation des risques. Wu et al. 2014 [140] ont proposé une approche basée sur un réseau bayésien flou (RB) qui peut fournir des recommandations pour l'analyse et la gestion de la sécurité dans les projets de construction et donc augmenter la probabilité de réussite d'un projet dans un environnement complexe. Aiyou et al. 2014 [141] ont utilisé une combinaison de l'arbre de défaillance (AdD) et la théorie triangulaire floue pour estimer la probabilité d'occurrence du feu dans une ville chinoise.

L'arbre de défaillance est une méthode importante pour analyser la sécurité de système (Aiyou et al. 2014) [141]. Par conséquent, l'approche commence par un événement supérieur (ES) et fonctionne en arrière sur les différents scénarios qui peuvent provoquer l'accident. Dans un arbre de défaillance, les portes logiques interconnectent l'événement supérieur (ES), et les événements intermédiaires (EI) et les événements basiques (EB) (Yuhua et Datao 2005) [103]. Les portes logiques booléennes montrent les relations entre les événements d'entrée nécessaires pour l'apparition d'une défaillance dans la sortie de la porte (Alvares et Hasegawa 1980) [142]. Les portes ET combinent les événements d'entrée qui doivent exister simultanément pour toute occurrence d'une défaillance. Les portes OU combinent également les événements d'entrée, mais un seul d'entre eux est suffisant pour provoquer la défaillance. Dans cette partie, nous allons utiliser l'arbre de défaillance pour analyser les causes. Pour connaître les conséquences de défaillance nous utilisons l'analyse du nœud papillon.

Pour la quantification du risque de FEP et de ses conséquences, nous allons utiliser des RB qui consistent en une série de nœuds représentant les interactions des variables qui sont exprimées en arcs entre les variables. Cependant, les arcs ne sont pas autorisés à former une boucle fermée. Le nœud représentant une variable qui sera liée à un certain nombre de nœuds "parents" dont il dépend. Les arcs représentent des dépendances probabilistes entre les nœuds «enfants» et les nœuds «parents», qui sont quantifiés (dépendances probabilistes) par un ensemble de tables de probabilités conditionnelles (TPC). Pour chaque variable, le tableau exprime sa probabilité étant dans un état particulier étant donné l'état de ses parents. (Liu et al 2013) [143].

Les chercheurs du domaine ont utilisé les RB dans leurs études. Mustafa et al. 2015 [144], par exemple, ont proposé une méthodologie bayésienne probabiliste pour le modèle structurel mettant à jour l'utilisation de données modales mesurées incomplètes qui prend également en compte différents types d'erreurs. Cho et coll. 2010 [145] ont utilisé le RB comme un outil pour évaluer les incertitudes dans la composante résistante d'une fonction d'état limite permet une évaluation probabiliste étendue de la durée de vie de la fatigue résultante d'un spécimen cible en termes de composants résistants de la gamme de contraintes, propriété matérielle. Wang et al. 2011 [146] ont adapté un modèle pour analyser les potentialités d'avoir des feux au large de la côte. Ceci est présenté par l'utilisation de la méthode traditionnelle de l'arbre de défaillance et RB pour incorporer l'effet du facteur organisationnel et humain. Lin et al. 2013 [147] ont utilisé la méthode bayésienne pour calculer les probabilités postérieures appartenant à chaque mode de fonctionnement en fonction de l'échantillon. La stratégie d'évaluation proposée est appliquée dans deux exemples : la première est la turbine à gaz de l'avion tandis que la seconde est une sécheuse industrielle. Ces deux exemples illustrent l'efficacité de la méthode mentionnée précédemment.

Rivas et al. [148] ont analysé les accidents de travail causés par les chutes de hauteur à l'aide d'un RB. Ko et al. 2010 [149] ont proposé un algorithme pour la détection précoce du feu sur la base de modèles irréguliers de feu et de réseaux hiérarchiques bayésiens. Hanea et Ale 2009 [85] (déjà cités dans le chapitre II) ont utilisé les RB comme un outil de décision basé sur le risque de mort humain dans les bâtiments de feu.

La question soulevée dans cette étude est le calcul de la probabilité d'occurrence de FEP, sachant que nous n'avons pas les probabilités d'occurrence précise de chaque EB. Ceci est pris en considération lorsque les données sur les EB sont définies librement ou lors de la considération d'informations non numériques comme le jugement d'un expert. Dans cette étude, nous avons résolu le problème en utilisant les jugements des experts basés sur chaque événement, et la logique floue est utilisée pour réduire l'incertitude des jugements des experts.

IV.2 Méthodes

Une approche systématique est développée à l'aide du NP, et la logique floue et les RB. Les trois étapes suivantes sont prises dans l'approche proposée :

Etape (1) : Nous avons effectué une identification des risques et une analyse des EB et de leurs relations de causalité avec la construction de l'arbre de défaillance.

Étape (2) : Nous avons obtenu les jugements de trois experts sur tous les EB et ensuite les transformer en nombres triangulaires flous (fuzzification). Ensuite, nous avons effectué une agrégation de nombres flous pour trouver un seul nombre flou, et ensuite nous avons fait la défuzzification pour ce nombre agrégé. Plus tard, nous avons obtenu une valeur numérique normale appelée la possibilité (P_s) que nous avons convertie en une probabilité d'occurrence de l'événement (P_r).

Étape (3) : La construction du RB selon le NP, et le calcul de la probabilité de feu et d'explosion des pipelines et les probabilités de ses conséquences.

IV.2.1 Construction de l'arbre de défaillance pour le feu et l'explosion des pipelines

Dans cette étude, le feu et l'explosion des pipelines (FEP) sont considérés comme l'événement supérieur (ES). Deux événements intermédiaires doivent se produire ensemble pour le FEP : «mélange explosif et sources d'ignition», donc ils doivent être connectés au ES par une porte ET. Diverses sources d'ignition peuvent exister dans l'environnement des pipelines : des étincelles, des étincelles statiques, feux ouverts, des étincelles de foudre, des étincelles d'appareils électriques et étincelles de courant de fuite. Chacun d'entre eux risquerait d'enflammer le mélange explosif si contacté, donc ils doivent être connectés par une porte OU. Il y a aussi de nombreuses causes qui peuvent conduire à des mélanges explosifs, telles qu'une fuite ou une rupture des pipelines. Ensuite, examiner ces événements comme des nouveaux événements intermédiaires, puis chacun d'entre eux sera développé par les événements basiques (EB). Poursuivre le développement de l'arbre de défaillance jusqu'à ce que toutes les branches résiliées par les événements de base ou sous-développées (tous les événements sont répertoriés dans le tableau (IV.1)). Enfin, un arbre de défaillance complet du FEP est réalisé comme il est montré dans la Figure IV.1. L'arbre de défaillance proposé comprend 72 événements basiques qui contribuent à l'apparition de l'accident.

Tableau IV. 1 Tous les événements de l'arbre de défaillance

Codes	Evènements	Codes	Evènements
X1	Concentration des contraintes	X57	Lampe électrique
X2	Contraintes résiduelles	X58	Protection cathodique
X3	Fortes contraintes internes	X59	Ligne haute tension
X4	Avec de l'eau	X60	Fuite électrique à proximité
X5	H ₂ S	X61	Ne pas installer des dispositifs de mise à la terre antistatique
X6	O ₂	X62	Résistance de terre non standard
X7	CO ₂	X63	Fil de prise de terre brisé
X8	Coups de bélier	X64	Appareil non-standard

X9	Charge externe	X65	Le temps de mesure de l'électricité statique ne suffit pas
X10	Défaut d'organisation	X66	Friction entre l'hydrocarbure d'éclaboussure et de l'air humide
X11	Qualité de l'opérateur	X67	Débris de métal Flottant sur la surface d'hydrocarbures
X12	Equipement	X68	Conductivité d'hydrocarbures
X13	Appareil	X69	Paroi intérieure rigoureuse
X14	Signalisation ignorée par les parties	X70	Haute vitesse d'écoulement d'hydrocarbures
X15	Agression par un tiers	X71	Opérateur à proximité d'un conducteur
X16	Surcharge	X72	Friction entre les fibres et le corps humain
X17	Glissement et affaissement de terrain	FEP	Feu et explosion de pipelines
X18	Séisme	N2	Présence d'un mélange explosif
X19	Inondation	N3	Sources d'ignition
X20	Problème de résistance	N4	Rupture
X21	Matériau non conforme	N5	Fuite
X22	Fissure	N6	Défaut de tube
X23	Inclusion	N7	Interférence de tierce partie
X24	Défaut cristallin	N8	Erreur opérationnelle
X25	Eraflure	N9	Corrosion
X26	Chanfreinage	N10	Défaut initial
X27	Soudure	N11	Amincissement par corrosion
X28	Revêtement interne	N12	Défaut de Conception
X29	Inhibiteurs de corrosion	N13	Événements naturels
X30	Défaillance de protection cathodique	N14	Erreur de maintenance
X31	PH	N15	Opération incorrecte
X32	Résistivité	N16	Fatigue par corrosion
X33	Teneur en eau	N17	CSC (Corrosion sous contrainte)
X34	Teneur en sel	N18	Défaut de construction
X35	Bactéries	N19	Défaut de matériau
X36	Courants vagabonds	N20	Chargements cycliques
X37	Potentiel redox	N21	Milieu corrosif
X38	Dégradation du revêtement	N22	Contraintes mécaniques
X39	Ne pas utiliser des outils anti explosion	N23	Milieu acide
X40	Collision d'outils en métal et la paroi du pipeline pendant l'opération de maintenance	N24	Corrosion externe
X41	Portez des chaussures contenant du fer	N25	Corrosivité du sol
X42	Fumeur	N26	Défaillance des moyens de protection
X43	Feu d'artifice	N27	Corrosion interne
X44	Véhicules sans pare-flammes	N28	Courants vagabonds
X45	Allumette	N29	Étincelles des appareils électriques
X46	Briquet	N30	Étincelles de foudre
X47	Flash direct de la foudre	N31	Feux ouverts

X48	Invasion de foudre au long du pipeline	N32	Étincelles statiques
X49	Induction par foudre	N33	Impact d'étincelle
X50	N'y a pas des installations de protection contre la foudre	N34	Terre imparfaite
X51	Paratonnerre endommagé	N35	Coup de foudre
X52	Défecteur endommagé	N36	Décharge électrostatique du corps humain
X53	Tige de mise à la terre endommagée	N37	Décharge électrostatique du pipeline
X54	Téléphone mobile	N38	Défauts de parafoudres
X55	Matériel audio-visuel ou photographique	N39	Accumulation de charges électrostatiques
X56	Moniteur et détecteur	N40	Terre imparfaite
/	/	N41	Erreur de mesure

IV.2.2 La logique floue

La théorie des ensembles flous est d'abord introduite par Zadeh 1965 [150] avec un effort pour traiter l'incertitude due à l'imprécision. Un ensemble flou \tilde{P} est généralement indiquée par un tilde "~", où X est caractérisé par une fonction d'appartenance $F_{\tilde{P}}(x)$ avec un intervalle de [0,1]. La fonction $F_{\tilde{P}}(x)$ représente la valeur de x dans \tilde{P} . Un nombre flou $\tilde{P} = (a, m, b)$ est appelé un nombre flou triangulaire (Figure IV.2), sa fonction d'appartenance est donnée par l'équation (IV.1) :

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & a \leq x \leq m \\ 1, & x = m \\ \frac{b-x}{b-m}, & m \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (IV.1)$$

Les estimations floues peuvent être agrégées par une probabilité floue unique définie comme $\tilde{P}_A(t) = (b - d_1, b, b + d_2)$ qui correspond la meilleure estimation de tous les experts Tyagi et al. 2010 [151], où :

$$d_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{1i} \quad (IV.2)$$

$$b = \frac{\min_{1 \leq i \leq n} a_i + \max_{1 \leq i \leq n} a_i}{2} \quad (IV.3)$$

$$d_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{2i} \quad (IV.4)$$

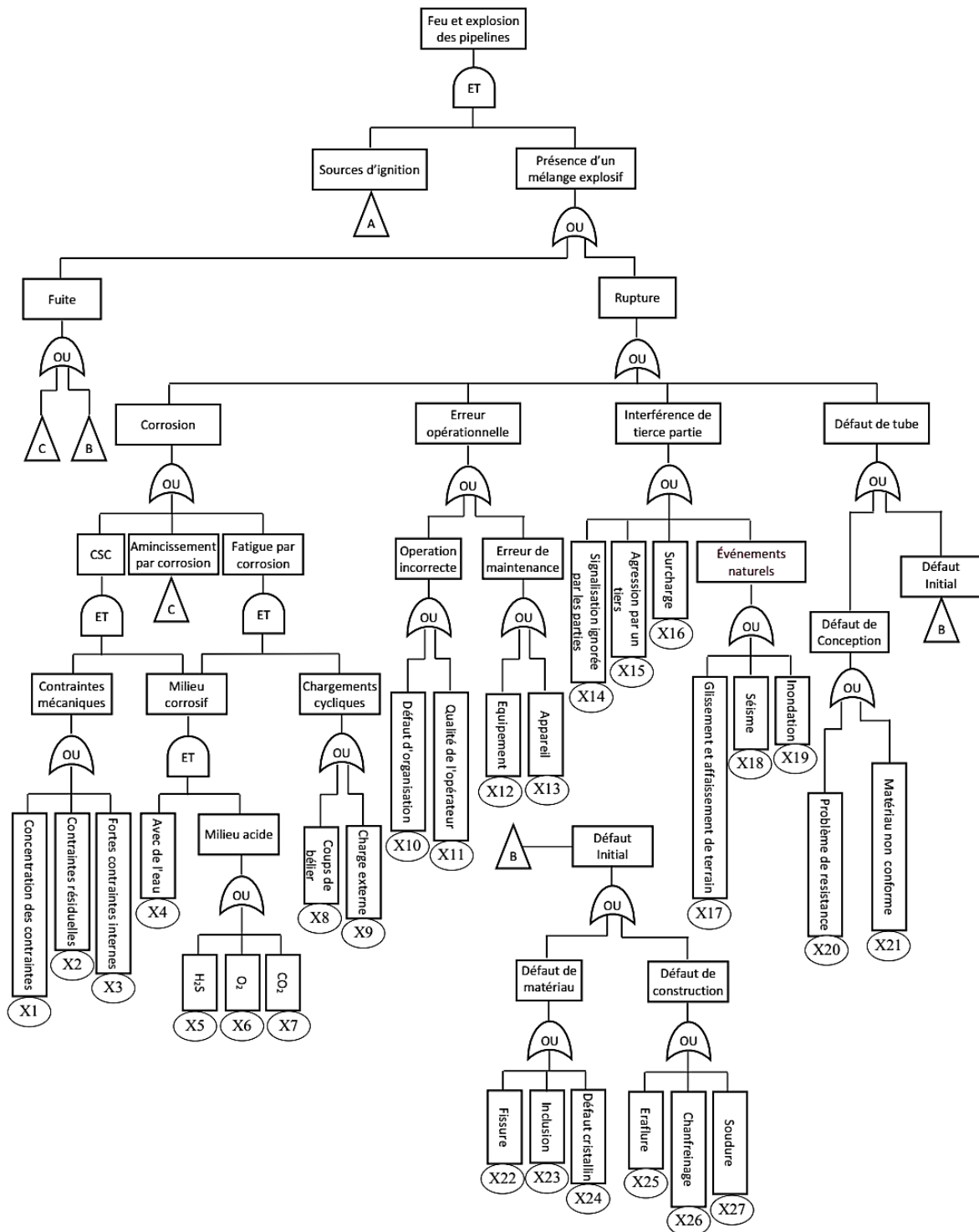


Figure IV. 1 L'arbre de défaillance pour le FEP

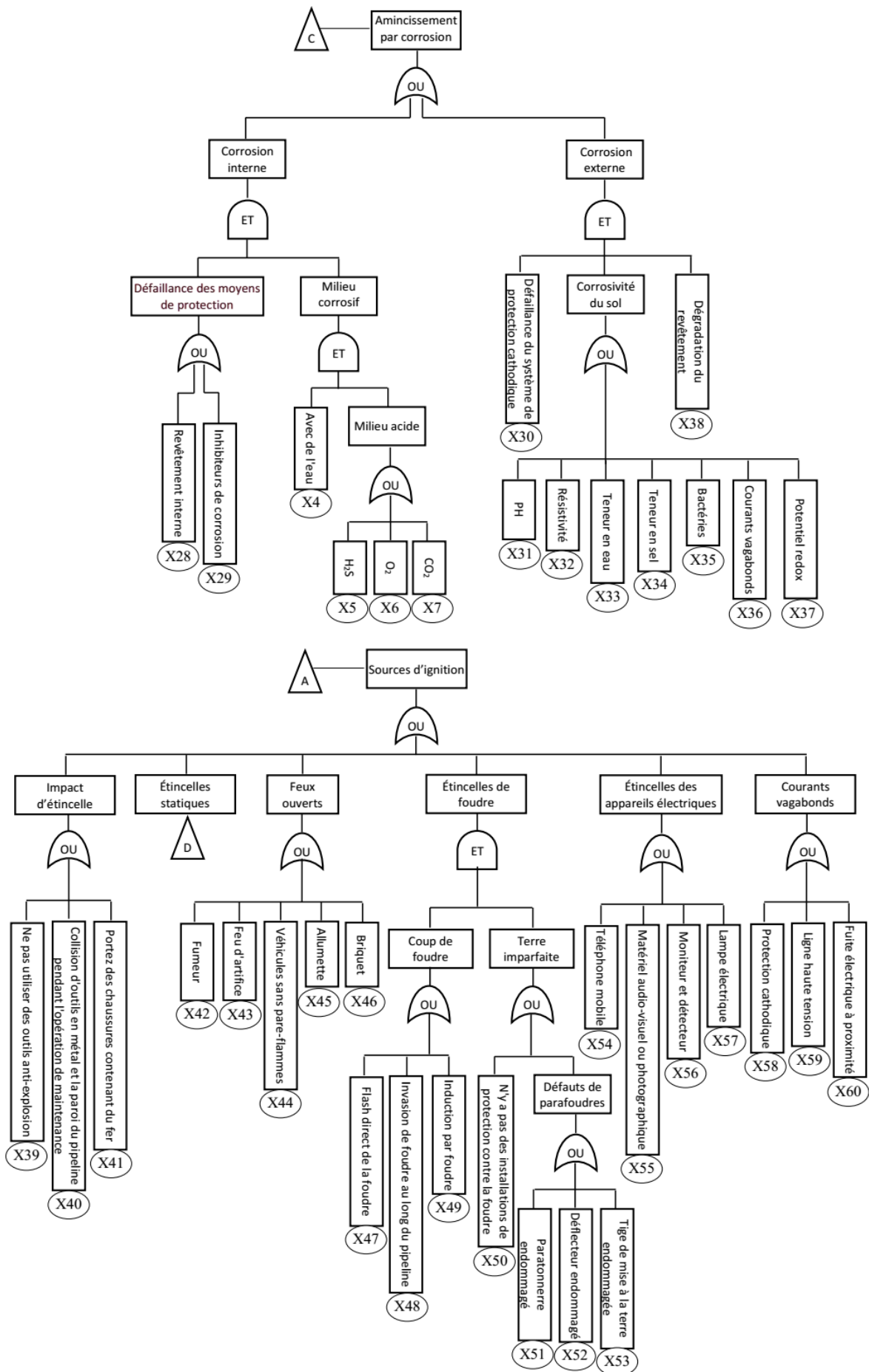


Figure IV. 1 A continué

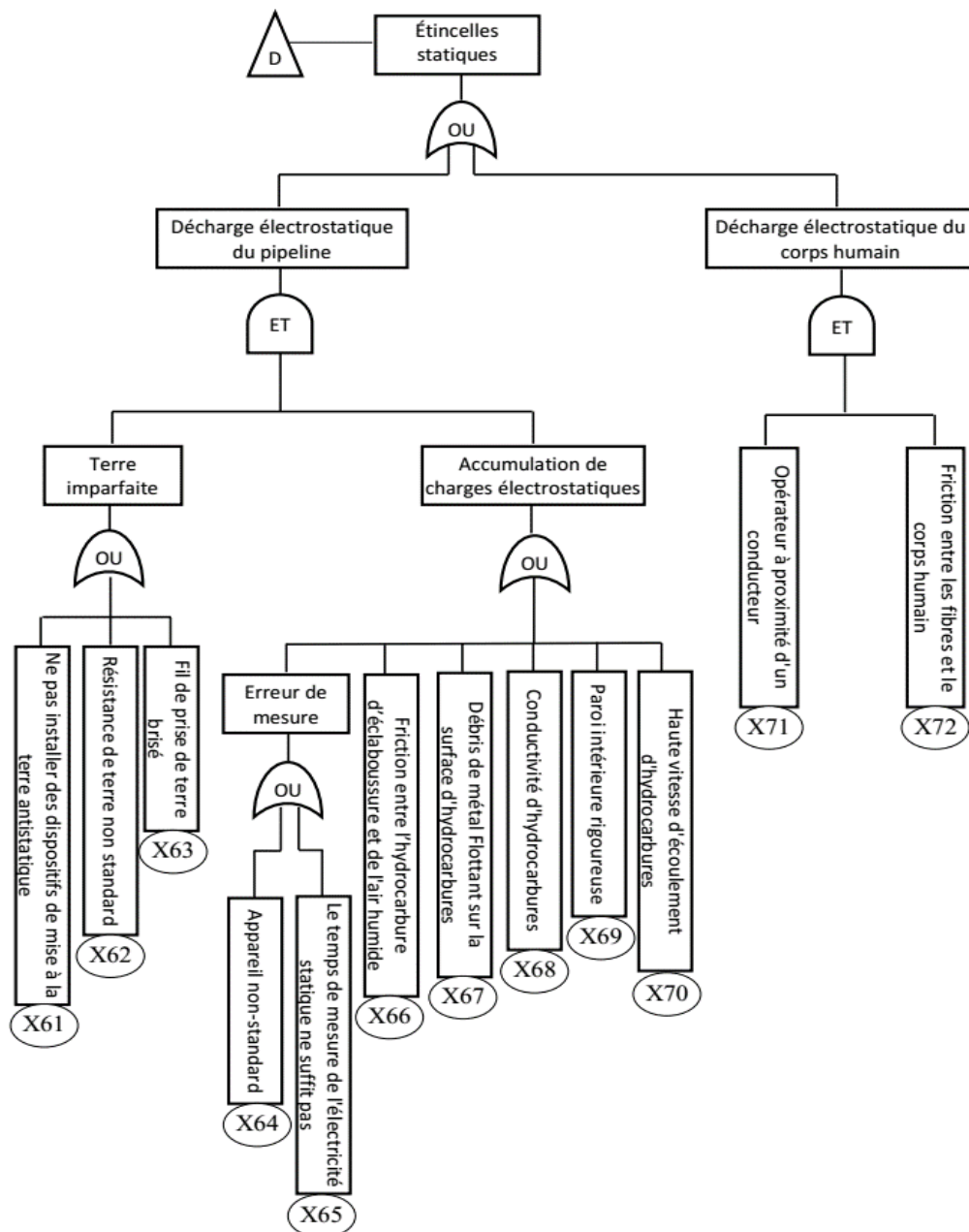


Figure IV. 1 A continué

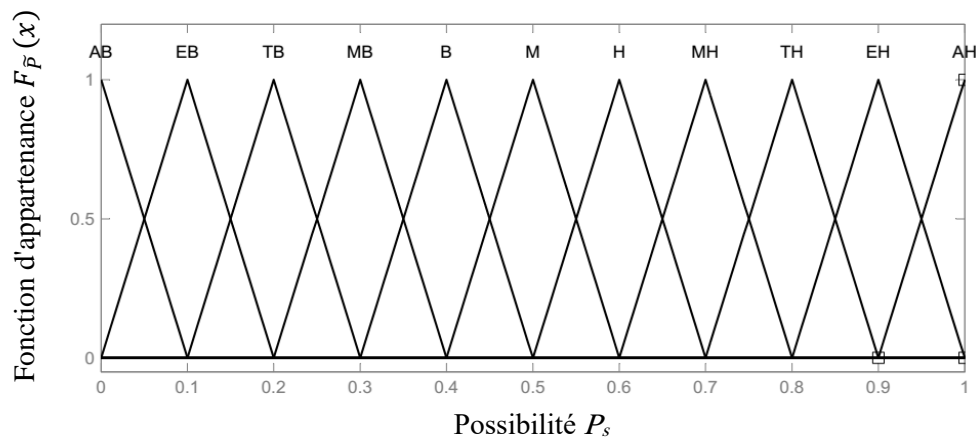


Figure IV. 2 Echelle floue des possibilités des évènements basiques

Voici un exemple illustratif de cette approche :

X : (0.1, 0.2, 0.3), (0.2, 0.3, 0.4), (0.1, 0.2, 0.3)

Nous allons essayer d'écrire X de cette façon : $\tilde{P}_A(t) = (a_i - c_{1i}, a_i, a_i + c_{2i})$

X : (0.2-0.1, 0.2, 0.2+0.1), (0.3-0.1, 0.3, 0.3+0.1), (0.2-0.1, 0.2, 0.2+0.1)

$$d_1 = \frac{0.1 + 0.1 + 0.1}{3} = 0.1$$

$$b = \frac{0.2 + 0.3}{2} = 0.25$$

$$d_2 = \frac{0.1 + 0.1 + 0.1}{3} = 0.1$$

Donc X : (0.25-0.1, 0.25, 0.25+0.1)

X : (0.15, 0.25, 0.35)

Cette valeur floue c'est la meilleure estimation de tous les experts.

Il existe plusieurs techniques pour la défuzzification. Dans cette étude la technique du centre de surface est employée. Mathématiquement, elle est exprimée par :

$$X^* = \frac{\int u_i(x) x dx}{\int u_i(x)} \quad (\text{IV. 5})$$

Où :

X^* : Sortie defuzzifiée ;

$u_i(x)$: Fonction d'appartenance agrégée ;

x : Variable de sortie.

Cette formule peut être appliquée pour la défuzzification des nombres flous triangulaires $A = (a_1, a_2, a_3)$ comme suit :

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} dx} = \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \quad (\text{IV.6})$$

Onisawa 1988 [152] a suggéré l'équation (7) pour convertir la possibilité (P_s) trouver après la défuzzification à une probabilité d'occurrence (P_r) :

$$P_r = \begin{cases} \frac{1}{10^K}, & P_s \neq 0 \\ 0, & P_s = 0 \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

Où :

$$K = \left[\frac{1 - P_s}{P_s} \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (\text{IV.8})$$

IV.2.3 Le Réseau Bayésien et le nœud papillon

Un Réseau Bayésien est un système représentant la connaissance et permettant de calculer des probabilités conditionnelles apportant des solutions à différentes sortes de problématiques.

Supposons deux événements A et B qui sont conditionnellement dépendants, le théorème de Bayes peut s'énoncer comme suite (Pearl 1982) [56] :

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (\text{IV.9})$$

Le terme $P(A)$ est la probabilité a priori de A.

Le terme $P(A|B)$ est appelée la probabilité a posteriori de A sachant B.

Un modèle NP est composé d'un AdD qui représente les facteurs de risque d'une défaillance, et d'un arbre d'événements AdE, qui représente les conséquences de cette défaillance. L'arbre de défaillance et l'arbre d'événements sont des méthodes graphiques efficaces et sont largement utilisés dans les analyses de sécurité des systèmes complexes (Khakzad et al. 2011) [153]. Voir la figure IV.3.

Les arbres d'événements sont utilisés dans le domaine de l'analyse de risque quantitative afin d'analyser les conséquences possibles qui peuvent survenir en raison d'événements

dangereux dans un système particulier. Les arbres d'événements, les arbres de défaillance sont fréquemment utilisés pour les raisons qui ont conduit à l'état grave qui commence la séquence de l'analyse d'accident. Leur origine remonte au moins à l'étude sur la sécurité des réacteurs WASH-1400 en 1975 [154].

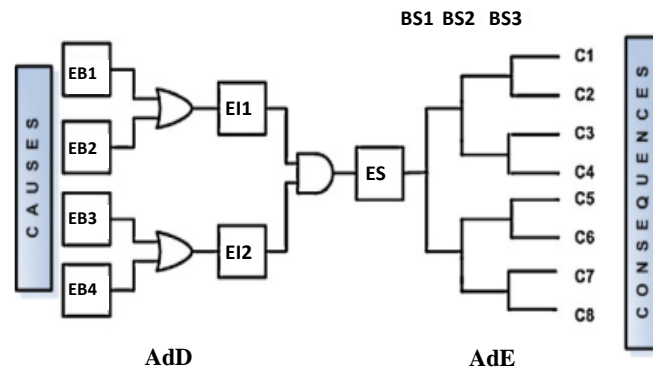


Figure IV. 3 Exemple d'un modèle NP (Khakzad et al. 2013 [155])

Pour passer de NP à un RB, nous avons utilisé un algorithme de cartographie comprenant des tâches graphiques et numériques. Dans la partie graphique, EB, EI et ES de l'AdD sont représentés sous forme de nœuds racines, de nœuds intermédiaires et de nœuds pivots dans le RB. Les nœuds dans un RB sont connectés de la même manière que les composants correspondants d'AdD. Dans la partie numérique, l'occurrence de probabilités des EB est affectée aux nœuds racines correspondants comme des probabilités à priori. Pour chaque nœud intermédiaire et nœud enfant, une TPC est développée. La TPC est développée en fonction du type de porte logique (Bobbio et al. 2001) [156]. La figure IV.4 montre la procédure simplifiée de passage de NP à RB.

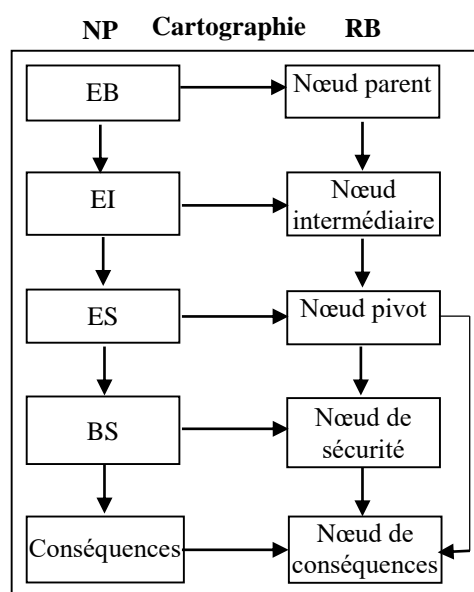


Figure IV. 4 Cartographie de BT en BN (Khakzad et al. 2013 [155])

La transformation de l'arbre des événements en RB est principalement basée sur le travail de Bearfield et Marsh 2005 [42]. Les barrières de sécurité sont représentées dans le RB par nœuds dont chacun contient deux cas : Fiabilité (R) et défaillance (F). Les conséquences de l'incident sont représentées par un seul nœud qui contient toutes les conséquences (neuf conséquences dans notre cas). De plus, la relation entre tous les nœuds nous permet de développer des liens entre eux ou non. La référence [56] contient tous les détails.

IV.3 Étude de cas

Le FEP dans la zone industrielle de Skikda fait l'objet d'un débat permanent entre les responsables de la raffinerie et les autorités locales de la province car cette zone industrielle est considérée comme une mine qui pourrait exploser la zone un jour au cas où d'un manque de contrôle sur ces incidents depuis leurs origines. Comme tous les pays en voie d'industrialisation de leur secteur économique, l'Algérie n'échappe pas au risque industriel ; par exemple, beaucoup d'explosions fortes qui ont abouti à des morts et des blessés ont secoué toute la zone industrielle et tous les sites gaziers de Skikda. La dernière de ces explosions a été le mardi 05 janvier 2016. De nombreuses et variées enquêtes sont engagées par la Compagnie Sonatrach pour discuter des causes du feu et des explosions afin de tenter de les éliminer, mais elles ont toutes échoué lamentablement.

La mise en œuvre de l'approche proposée offre la possibilité de rouvrir l'enquête sur les causes de l'accident ; ce qui est utile pour prévenir ou réduire la survenue de tels accidents à l'avenir.

Dans cette étude, trois experts ($E1$, $E2$, $E3$) sont invités pour effectuer des évaluations en vue de saisir leurs jugements linguistiques sur les probabilités des EB. Une échelle d'évaluation linguistique à onze niveaux, à savoir {Absolument Basse (AB), Extrêmement Basse (EB), Très Basse (TB), Basse (B), Modérément Basse (MB), Moyenne (M), Modérément Haute (MH), Haute (H), Très Haute (TH), Extrêmement Haute (EH), Absolument Haute (AH)}. Voir la figure IV.2.

IV.3.1 Analyse de nœud papillon

Après avoir décrit l'accident, le NP a été interrogé sur lui et sur ses scénarios prévus et l'efficacité de diverses mesures de sécurité (figure IV.5).

Huit conséquences pourraient se produire pour le scénario d'accident, selon le succès ou l'échec des barrières de sécurité. Pour le détecteur d'incendie et le système de protection (FDPS)

peut fonctionner même s'il n'y avait pas d'incendie. Il y a un neuvième cas, un cas de sécurité totale en l'absence d'une libération de gaz (Tableau IV.2).

Les probabilités d'occurrence des EB ont été estimées en utilisant la logique floue et sont présentées dans le Tableau IV.3.

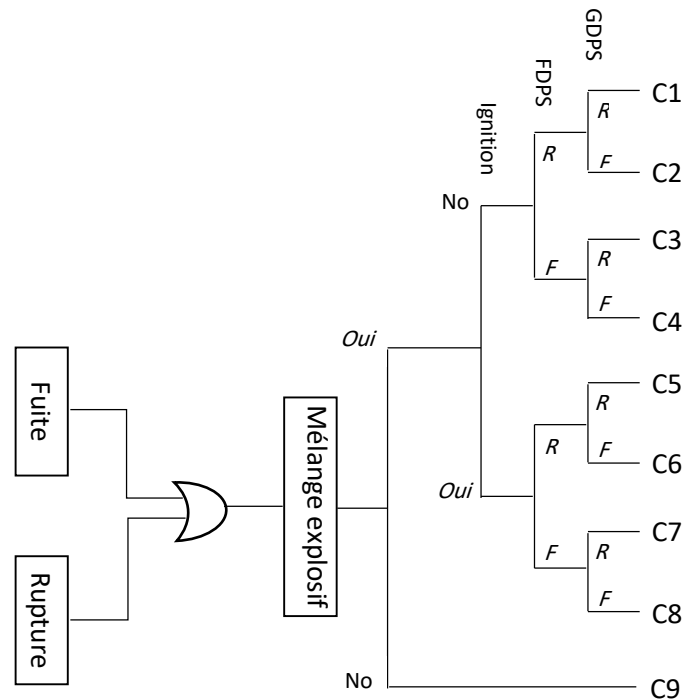


Figure IV. 5 Modèle de NP pour le scénario du FEP

Tableau IV. 2 Description des conséquences de FEP

Symbol	Description
C1	Processus d'évacuation réussie
C2	Nuages de vapeur disséminés au sol, pollution de l'environnement
C3	Processus d'évacuation réussie, possibilité d'ignition retardée
C4	Nuage de vapeur, pollution de l'environnement, possibilité d'ignition retardée
C5	Incendie, pertes matérielles modérées, faible taux de victimes
C6	Incendie, pertes matérielles modérées, nombre de victimes élevé
C7	Incendie, pertes importantes de matériaux, faible taux de victimes
C8	Incendie, pertes importantes de matières, péage élevé des victimes
C9	État de sécurité

On peut rappeler que la probabilité de défaillance (F) des barrières de sécurité (FDPS et GDPS (décteur de gaz et système de protection)) affectée par la présence d'un incendie est la suivante :

En cas d'incendie: $F_{GDPS} = 0,3$, $F_{FDPS} = 0,11$.

En cas d'absence d'incendie: $F_{GDPS} = 0,2$, $F_{FDPS} = 0,2$.

Tableau IV. 3 Jugements d'experts et valeurs de probabilité pour tous les EB

BE	Jugement d'expert			Agrégation des nombres flous	Conversion	
	E_1	E_2	E_3		P_s	P_r
X1	EB	EB	TB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X2	TB	TB	EB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X3	TB	MB	MB	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X4	M	M	B	(0.35,0.45,0.55)	0.45	0.003465941
X5	TB	TB	MB	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X6	AB	AB	EB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X7	EB	EB	EB	(0,0.1,0.2)	0.10	1.63579E-05
X8	EB	EB	TB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X9	MB	MB	B	(0.25,0.35,0.45)	0.35	0.00148477
X10	M	B	M	(0.35,0.45,0.55)	0.45	0.003465941
X11	MB	M	MB	(0.3,0.4,0.5)	0.40	0.002322804
X12	EB	EB	EB	(0,0.1,0.2)	0.10	1.63579E-05
X13	B	B	B	(0.3,0.4,0.5)	0.40	0.002322804
X14	B	M	M	(0.35,0.45,0.55)	0.45	0.003465941
X15	AH	AH	AH	(0.9,1,1)	0.97	0.1896
X16	AH	AH	EH	(0.85,0.95,0.98)	0.93	0.1068
X17	B	B	M	(0.35,0.45,0.55)	0.45	0.003465941
X18	AH	EH	AH	(0.85,0.95,0.98)	0.93	0.1068
X19	AB	EB	EB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X20	EB	EB	TB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X21	AB	AB	AB	(0,0,0.1)	0.03	4.672E-08
X22	AB	EB	EB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X23	AH	AH	AH	(0.9,1,1)	0.97	0.1896
X24	AB	AB	AB	(0,0,0.1)	0.03	4.672E-08
X25	TB	EB	AB	(0,0.06,0.16)	0.07	3.55001E-06
X26	EB	EB	AB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X27	TB	TB	MB	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X28	TB	MB	TB	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X29	M	M	H	(0.45,0.55,0.65)	0.55	0.007044978
X30	M	M	M	(0.4,0.5,0.6)	0.50	0.005000345
X31	EB	EB	TB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X32	EB	TB	TB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X33	M	B	B	(0.35,0.45,0.55)	0.45	0.003465941
X34	MB	MB	MB	(0.2,0.3,0.4)	0.30	0.000887285
X35	EB	TB	MB	(0.1,0.2,0.3)	0.20	0.000222531
X36	AB	AB	EB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X37	EB	EB	TB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X38	B	M	H	(0.4,0.5,0.6)	0.50	0.005000345
X39	EB	TB	EB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X40	MB	MB	TB	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X41	AB	AB	AB	(0,0,0.1)	0.03	4.672E-08
X42	AH	AH	AH	(0.9,1,1)	0.97	0.1896
X43	EB	EB	AB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06

X44	AB	EB	EB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X45	AB	AB	AB	(0,0,0.1)	0.03	4.672E-08
X46	AH	AH	AH	(0.9,1,1)	0.97	0.1896
X47	AB	EB	EB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X48	EB	AB	EB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X49	AB	EB	AB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X50	EB	EB	AB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X51	TB	MB	TB	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X52	M	B	B	(0.35,0.45,0.55)	0.45	0.003465941
X53	TB	MB	MB	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X54	AH	AH	EH	(0.85,0.95,0.98)	0.93	0.1068
X55	TB	TB	TB	(0.1,0.2,0.3)	0.20	0.000222531
X56	EB	EB	AB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X57	TB	TB	MB	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X58	TB	MB	MB	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X59	MB	MB	B	(0.25,0.35,0.45)	0.35	0.00148477
X60	M	M	B	(0.35,0.45,0.55)	0.45	0.003465941
X61	EB	EB	EB	(0,0.1,0.2)	0.10	1.63579E-05
X62	EB	TB	TB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X63	M	B	M	(0.35,0.45,0.55)	0.45	0.003465941
X64	TB	EB	TB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X65	EB	EB	TB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X66	AB	AB	EB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X67	AB	AB	EB	(0.02,0.05,0.15)	0.07	3.55001E-06
X68	TB	EB	EB	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X69	EB	EB	EB	(0,0.1,0.2)	0.10	1.63579E-05
X70	MB	MB	B	(0.25,0.35,0.45)	0.35	0.00148477
X71	B	B	MB	(0.25,0.35,0.45)	0.35	0.00148477
X72	M	H	H	(0.45,0.55,0.65)	0.55	0.007044978

Ce modèle (Figure IV.6) a été créé selon le NP du FEP. Il est utilisé pour évaluer la probabilité de défaillance pour tous les types de pipelines. Ce modèle a été créé à l'aide du logiciel Agena risk 2014 [157]. Nous avons mis la probabilité d'occurrence de tous les nœuds parents (EB) dans le logiciel Agena, puis nous avons rempli les TPC des nœuds intermédiaires et ES en fonction des portes logiques dans l'Add de FEP. Le logiciel a calculé la probabilité d'occurrence des EI et ES en utilisant le théorème de Bayes après avoir appuyé sur le bouton Run. Par exemple, l'occurrence de l'ES (FEP) doit être l'occurrence des deux événements (N2 et N3) ensemble (Figure IV.7).

Nous pouvons calculer la probabilité d'occurrence de FEP en utilisant l'algèbre de Boole :

$$Poc(FEP) = Poc(N2) * Poc(N3)$$

$$Poc(FEP) = 0.48422 * 0.41738$$

$$Poc(FEP) = 0.2021$$

C'est le même résultat obtenu avec le logiciel Agena (Figure IV.8).

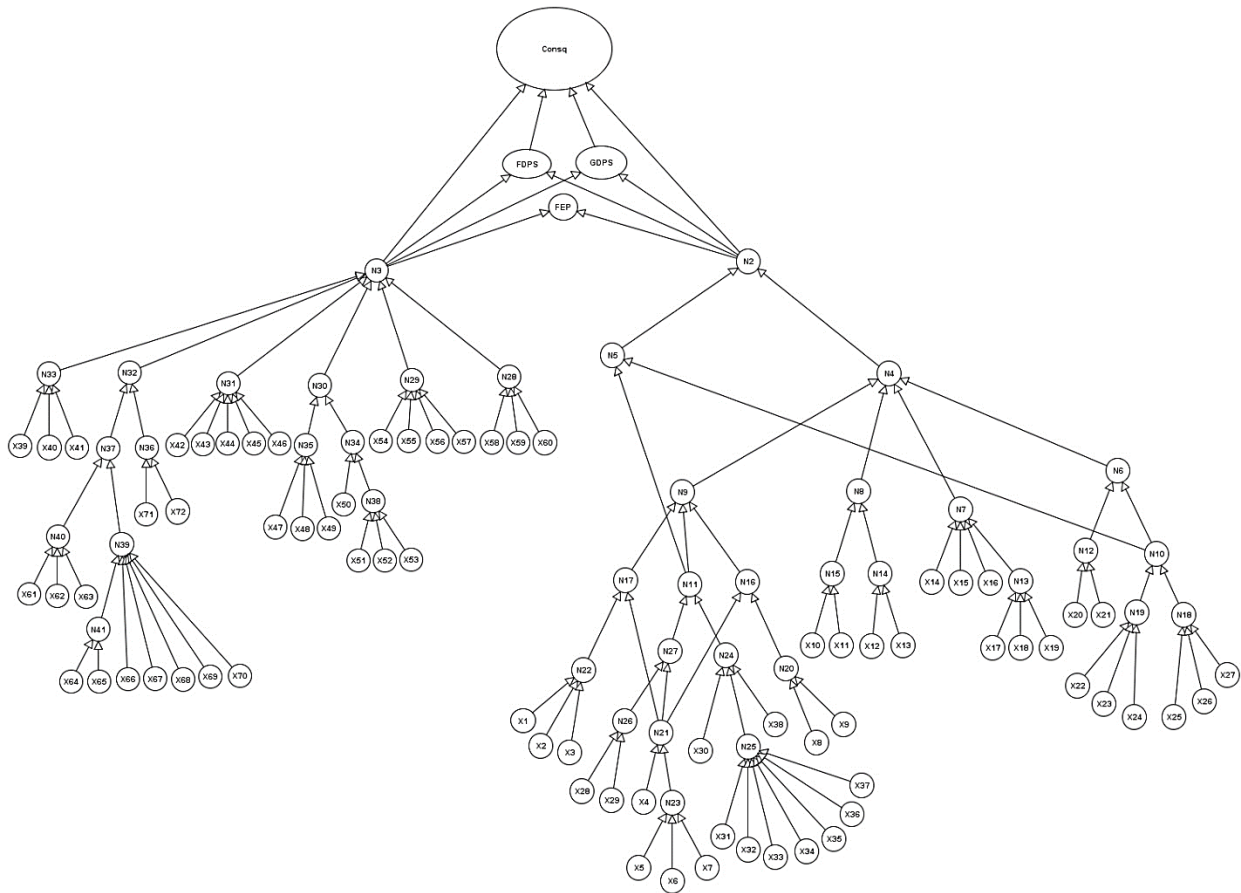


Figure IV. 6 RB conforme à NP (figure IV.5)

Figure IV. 7 TPC du FEP

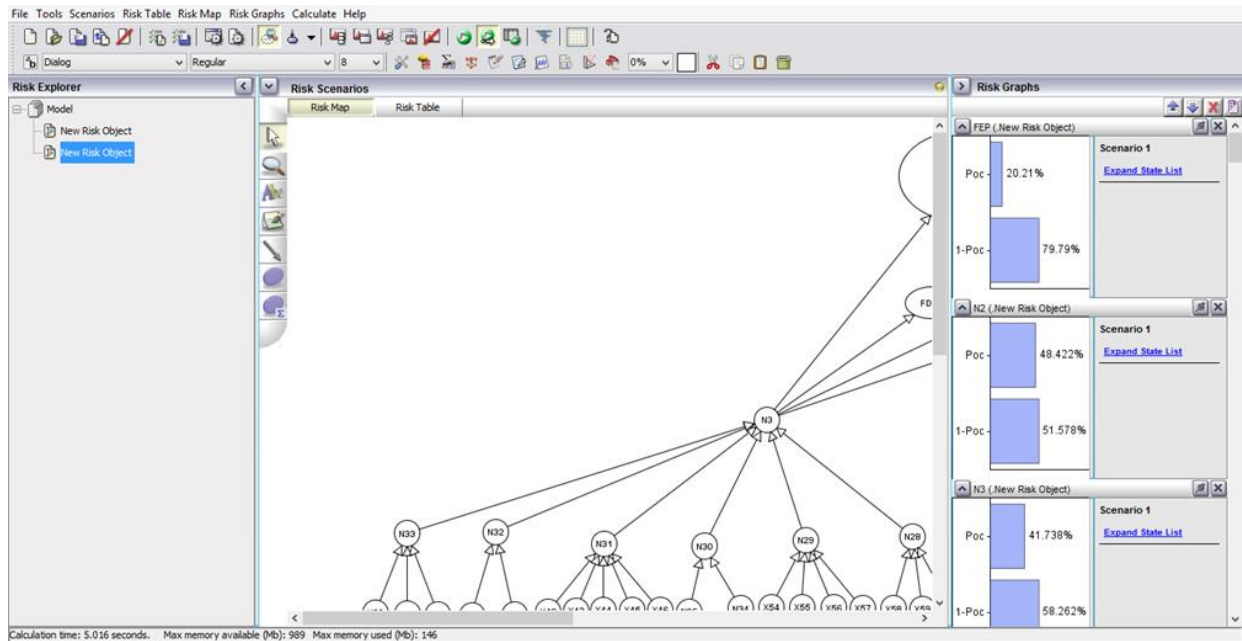


Figure IV. 8 Poc du FEP, N2 et N3

IV.3.2 Résultats et discussion

Les calculs ont été faits par l'approche bayésienne et la logique floue. Les résultats montrent que :

1. La valeur de probabilité d'occurrence de FEP est calculée par l'approche bayésienne est égale à 20,21% (Voir l'annexe pour les probabilités d'occurrence de la rupture et la fuite) ;
2. La probabilité d'apparition du mélange explosif (N2) est égale à 48,422% ;
3. La probabilité d'apparition de l'ignition (N3) est égale à 41,738% ;
4. Les probabilités d'occurrence des conséquences sont présentées à la figure IV.9 ;

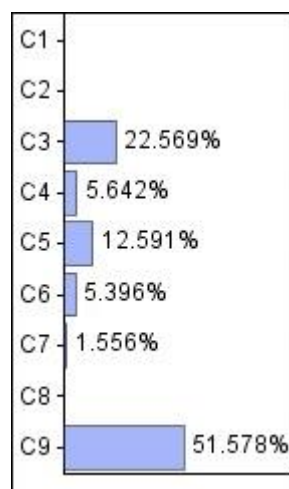


Figure IV. 9 Poc des conséquences de FEP

5. La logique floue fournit des informations détaillées sur la contribution de chaque EB à la survenance du FEP ;
6. L'importance du NP qui a contribué efficacement à la construction de RB de FEP.

Grâce aux résultats obtenus :

Nous notons que les conséquences C1 et C2 sont moins sévères que C3 et C4, respectivement. Cela est dû à l'efficacité du FDPS qui fonctionne même en l'absence d'incendie. Ceci explique l'absence de l'ignition retardée dans C1 et C2. L'apparition des conséquences C4, C5, C6, C7 en raison de la présence de gaz qui a fui et brûlé mais nous pensons que le scénario conduit à la conséquence C7 serait le scénario le plus probable dans ce cas (décès et blessures) car le FDPS a échoué. Quant à la C8, la probabilité de son occurrence est très faible parce que celle de défaillance des deux systèmes (FDPS et GDPS) en même temps est un scénario qui est improbable de se produire.

En général, les attributs remarquables de l'approche proposée (résilience au manque de précision, données, informations sur la probabilité d'occurrence de EB) confirment que l'approche proposée permet une meilleure évaluation de la probabilité d'occurrence de FEP. Il s'agit donc d'une aide efficace pour la gestion des risques et la prise de décision.

IV.4 Conclusion

Cette étude nous a permis d'identifier en grande partie le scénario de l'accident et ses causes. Le scénario qui a mené à l'apparition de la conséquence C7 est ce qui s'est réellement passé dans notre étude de cas. En conséquence, nous affirmons la fiabilité du FDPS afin d'éviter toutes les causes conduisant à l'apparition d'un feu et d'une explosion. Les conclusions suivantes sont tirées :

1. Le NP est construit pour le FEP et l'analyse de l'AdD montre qu'il comprend pleinement 72 EB qui mènent éventuellement à l'accident.
2. L'approche proposée montre que la démarche bayésienne et la théorie des ensembles flous est démontrée comme une méthode flexible et efficace pour estimer la probabilité d'occurrence de FEP lorsqu'elle répond à l'incertitude des bases de données.
3. L'approche peut être utilisée pour effectuer des investigations qui peuvent fournir des informations précieuses au décideur pour améliorer les performances en matière de sécurité du réseau de transport des hydrocarbures.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

L'absence de modèles efficaces motive cette recherche pour élaborer un modèle complet axé sur les risques liés au transport des hydrocarbures par pipelines. Le modèle développé dans cette recherche fournit une image complète des risques liés aux pipelines. Ce modèle est capable de prédire la probabilité et le niveau des conséquences des défaillances des pipelines. La probabilité de défaillance est calculée à l'aide d'un modèle bayésien de prédiction quantitatif basé sur le nœud papillon. Le modèle prédit d'abord la probabilité de défaillance pour six sources principales de défaillance des pipelines, puis la probabilité de l'occurrence d'une ignition pour six sources principales, et enfin la probabilité du feu et d'explosion des pipelines en utilisant la théorie des probabilités conditionnelles. Les principales contributions de cette recherche sont les suivantes :

- Un cadre pour élaborer des modèles d'évaluation des risques pour différents types d'infrastructure à l'aide de données historiques ;
- Un modèle probabiliste fondé sur l'approche bayésienne pour prédire la probabilité de défaillance des pipelines ;
- L'obtention des probabilités des événements basiques du modèle de défaillance pour prévoir les conséquences en utilisant une technique de la logique floue ;
- Le modèle de prédiction de la probabilité de défaillance tient en compte l'interdépendance des événements basiques.

La recherche comporte certaines limites, qui peuvent être résumées comme suit :

- La négligence des coûts financiers pour l'accident ;
- L'outil développé oblige toujours l'analyste à faire entrer les probabilités des événements basiques pour chaque type de scénario ;
- En l'absence d'experts, l'efficacité du modèle sont considérablement réduits.

Le modèle développé a été en mesure d'atteindre les objectifs proposés de la recherche, mais certains domaines sont recommandés pour l'amélioration à l'avenir :

- Collecter plus de données afin de considérer l'interdépendance des sources de défaillance les uns des autres, en particulier l'effet de l'amincissement de l'épaisseur de la paroi sur

les sources de défaillance indépendantes du temps. L'amélioration peut aider à étendre le modèle pour considérer l'effet de la corrosion sur d'autres probabilités de défaillance ;

- Développer un modèle de prédiction de conséquences non-financier de défaillance, par exemple la quantité de produit libéré dans l'environnement basé sur un scénario de défaillance. La prévision des effets environnementaux de la défaillance des pipelines nécessite davantage de données y compris le taux de décharge, la taille du trou et l'estimation du temps pendant lequel la fuite pourrait se produire ;
- Examiner les types de défauts possibles dans l'élaboration de scénarios de réadaptation. Ce modèle pourrait être capable de prédire les types de défauts qui peuvent causer la défaillance d'un pipeline et ainsi permettre de planifier l'entretien en conséquence.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Larousse. (1999). Larousse Définitions.
- [2] Flanagan, R., & Norman, G. (1993). Risk Management and Construction. Blackwell Science Ltd.
- [3] Larousse. (2006). Larousse Définitions.
- [4] Larousse. (2005). Larousse Expression.
- [5] [HMSO 95]. A guide to Risk Assessment and Risk Management for Environmental Protection. England: Her Majesty's Stationery Office. (1995).
- [6] [GT Aspects sémantiques du risque, 1997]. Vocabulaire lié au risque à travers une analyse bibliographique. Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) - Observatoire de l'Opinion sur les Risques et la Sécurité. (1997).
- [7] GT Méthodologie. (2003). Principes généraux pour l'élaboration et la lecture des études de dangers. INERIS.
- [8] [BSI OHSAS 18001]. Occupational Health and Safety Management Systems – Specification. England. (2005).
- [9] [NF EN 61508]. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques et électroniques programmables relatifs à la sécurité. Paris: AFNOR. (1998).
- [10] ISO 14971. (2007). Medical Device Risk Management. ISO.
- [11] [ISO/CEI Guide 73, 2002]. Management du risque – Vocabulaire – principes directeurs pour l'utilisation dans les normes. ISO/CEI. (2002).
- [12] NF EN 50129. (Mai 2003). Applications ferroviaires : Systèmes de signalisation, de télécommunication et de traitement, Systèmes électroniques de sécurité pour la signalisation. Paris: AFNOR.
- [13] NF EN 50126. (Janvier 2000). Applications ferroviaires : Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS). Paris: AFNOR.
- [14] Directive 96/82/EC (SEVESO II). (9 décembre 1996). European directive on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. Brussels: Official Journal of the European Union, Commission of the European Communities.
- [15] Périlhon P., Du risque à l'analyse des risques : Développement d'une méthode MOSAR, méthode organisée et systémique d'analyse de risques, document de travail, janvier 1998.
- [16] [HSE, 1992]. Generic terms and concepts in the assessment and regulation of industrial Risks. UK: Health and Safety Executive. (1992).

- [17]Laurant, A. (2003). Sécurité des procédés chimiques. Lavoisier.
- [18]AQS-GT OORS. (Mars 1996). Management de la sécurité d'entreprise, vocabulaire et concept. Association Qualité-Sécurité (AQS) pour l'Observatoire de l'Opinion sur les Risques de la Sécurité.
- [19][GT 7 – CEI]. Enseignement - Terminologie. CEI.
- [20][ISO/CEI Guide 51. (1999)]. Aspects liés à la sécurité – principes directeurs pour les inclure dans les normes. ISO/CEI (1999).
- [21]ISO 31000. (2009). Management du risque Principes et lignes directrices. ISO.
- [22]Forsberg, K, Mooz, H. and Cotterman, H. (2005) Visualizing Project Management Models and Frameworks for Mastering Complex Systems (3rd Edition), John Wiley & Sons Ltd, New Jersey.
- [23]Chapman, R. J. (2001) The Controlling Influences on Effective Risk Identification and Assessment for Construction Design Management, International Journal of Project Management, Vol. 19 (3), pp 147-160.
- [24]Project Management Institute (PMI) (2004) A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), Third Edition, USA.
- [25]Thompson, P. and Perry J. G., (1992) Engineering Construction Risks: A Guide to Project Risk Analysis and Risk Management, Thomas Telford Publishing, London.
- [26]Heldman, K. (2005) Project Manager's Spotlight on Risk Management, Harbor Light Press, United States of America.
- [27]Chapman, C. and Ward, S. (1997) Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights (2nd Edition), John Wiley & Sons Ltd, England.
- [28]Restrepo, L. F. (1995) Combining Qualitative and Quantitative Risk Assessment Results into a Common Risk Measure, American Society of Mechanical Engineers, pp 3-14.
- [29]Patterson, F. D. and Neailey, K. (2002) A Risk Register Database System to Aid the Management of Project Risk, International Journal of Project Management, Vol. 20 (5), pp 365–374.
- [30]Cooper, F. D., Grey, S., Raymond, G. and Walker, P. (2005) Project Risk Management Guidelines: Managing Risk in Large Projects and Complex Procurements, John Wiley & Sons Ltd, England.
- [31]Bandyopadhyay, D. (2005). Technological Risk Assessment. i. H. ERRIS (kolkata. 2006).

- [32] Smeder, M., Christou, M., & Besi, S. (1996). Land Use Planning in the Context of Major Accident Hazards: An Analysis of Procedures and Criteria in Selected EU Member States. Inst. for Systems, Informatics and Safety, Major Accident Hazards Bureau.
- [33] Shickin, A. V. (2004). "Assessment Methodologies at Hazardous industrial Facilities and Facilities Handling Radioactive/Nuclear materials." 14-37.
- [34] ERICSON C. 1999. "Fault Tree Analysis – A History." Proceedings of the 17th International System Safety Conference 1999.
- [35] VESELY W.E., STAMATELATOS M., DUGAN J.B., FRAGOLA J., MINARICK J., RAILSBACK J., 2002. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. NASA Office of Safety and Mission Assurance.
- [36] VESELY W.E., NARUM R.E. 1970. PREP and KITT: Computer codes for the Automatic Evaluation of a Fault Tree. IN-1349 (1970) pp 188.
- [37] ISOGRAPH SOFTWARE, 2002. Fault Tree+ v10.1. Software tool (<http://www.isographsoftware.com>)
- [38] VILLEMEUR A. 1992. Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment: Volume 1. Chichester, UK. John Wiley & Sons.
- [39] C.R. Sundararajan (1991). Guide to Reliability Engineering. Data Analysis, Applications, Implementation, and Management, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 239–240.
- [40] ANDREWS J.D. 2000. "To not or not to not." Proceedings of the 18th International System Safety Conference, Fort Worth, Sept 2000. pp 267-275.
- [41] Palshikar G.K. 2001. "Temporal Fault Trees." Information and Software Technology #44 (2002), pages 137-150.
- [42] Bearfield G, Marsh W. Generalizing event trees using Bayesian networks with a case study of train derailment. Lecture Notes in Computer Science 2005; 3688: 52-66.
- [43] Rathnayaka S, Khan F, Amyotte P. SHIPP methodology: predictive accident modeling approach. Part II. Validation with case study. Process Safety and Environmental Protection 2011b; 89: 75-88.
- [44] Meel A, Seider WD. Plant-specific dynamic failure assessment using Bayesian theory. Chemical Engineering Science 2006; 61: 7036-56.
- [45] Kalantarnia, M., Khan, F., & Hawboldt, K. (2009). Dynamic risk assessment using failure assessment and Bayesian theory. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22(5), 600-606.

- [46] Kalantarnia, M., Khan, F., & Hawboldt, K. (2010). Modelling of BP Texas City refinery accident using dynamic risk assessment approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(3), 191-199.
- [47] Delvosalle, C., Fiévez, C., Pipart, A., Fabrega, J. C., Planas, E., Christou, M., & Mushtaq, F. (2005). Identification of reference accident scenarios in SEVESO establishments. *Reliability Engineering & System Safety*, 90(2), 238-246.
- [48] Delvosalle, C., Fievez, C., Pipart, A., & Debray, B. (2006). ARAMIS project: a comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. *Journal of Hazardous Materials*, 130(3), 200-219.
- [49] J. Pearl, "Bayesian networks," Technical Report R-246, MIT Encyclopedia of the Cognitive Science, October 1997.
- [50] F. V. Jensen, *An Introduction to Bayesian Networks*. London, UK: University College London Press, 1996.
- [51] J. Pearl, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1988.
- [52] J. Pearl, "Constraint-propagation approach to probabilistic reasoning," in L. M. Kanal and J. Lemmer (Eds.), *Uncertainty in Artificial Intelligence*, North Holland, Amsterdam, pp. 357-288, 1986.
- [53] T. S. Verna, "Causal networks: Semantics and expressiveness, *Proceedings of the Third Workshop on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pp. 352-359, 1987.
- [54] F.V. Jensen, "Bayesian network basics," *AISB Quarterly*, vol. 94, pp. 9-22, 1996.
- [55] D. Heckerman, "A tutorial on learning Bayesian networks" Technical Report MSR-TR-95-06, Microsoft Research, 1995.
- [56] J. Pearl, "Reverend Bayes on inference engines: A distributed hierarchical approach," in *Proceedings AAAI National Conference on AI*, Pittsburgh, PA, pp. 133-136, 1982.
- [57] J. H. Kim and J. Pearl, "A computational model for combined causal and diagnostic reasoning in inference systems," in *Proceedings IJCAI-83*, Karlsruhe, Germany, pp. 190-193, 1983.
- [58] S. L. Lauritzen and D. J. Spiegelhalter, "Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems," *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, vol. 50(2), pp. 157-224, 1988.
- [59] G. F. Cooper and E. Herskovits, "A Bayesian method for constructing Bayesian belief networks from databases," in *Proceedings of the Conference on Uncertainty in AI*, pp. 86-94, 1990.

- [60] Uusitalo L (2007) Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecol Model* 203 (3–4):312-318.
- [61] Kontkanen P, Myllymäki P, Silander T, Tirri H Comparing predictive inference methods for discrete domains. In: *Proceedings of the sixth International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics*, Ft. Lauderdale, USA, 1997. pp 311-318.
- [62] Sousa RL, Einstein HH (2012) Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study. *Tunn Undergr Sp Tech* 27 (1):86- 100.
- [63] Aguilera PA, Fernández A, Fernández R, Rumí R, Salmerón A (2011) Bayesian networks in environmental modelling. *Environ Modell Softw* 26 (12):1376- 1388.
- [64] Landuyt D, Broekx S, D'Hondt R, Engelen G, Aertsens J, Goethals PLM (2013) A review of Bayesian belief networks in ecosystem service modelling. *Environ Modell Softw* 46 (0):1- 11.
- [65] Batchelor C, Cain J (1999) Application of belief networks to water management studies. *Agr Water Manage* 40 (1):51-57.
- [66] Cain JD, Jinapala K, Makin IW, Somaratna PG, Ariyaratna BR, Perera LR (2003) Participatory decision support for agricultural management. A case study from Sri Lanka. *Agr Syst* 76 (2):457-482.
- [67] Bayraktarli YY Application of Bayesian probabilistic networks for liquefaction of soil. In: *6th International PhD Symposium in Civil Engineering*, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, 2006.
- [68] Huang HW, Zhang J, Zhang LM (2012) Bayesian network for characterizing model uncertainty of liquefaction potential evaluation models. *KSCE J Civ Eng* 16 (5):714-722.
- [69] Schubert M, Hoj NP, Ragnoy A, Buvik H (2012) Risk Assessment of Road Tunnels using Bayesian Networks. *Transp Res Arena* 2012 48:2697-2706.
- [70] Zhang L, Wu X, Ding L, Skibniewski MJ, Yan Y (2013) Decision support analysis for safety control in complex project environments based on Bayesian Networks. *Expert Syst Appl* 40 (11):4273-4282.
- [71] Wu X, Liu H, Zhang L, Skibniewski MJ, Deng Q, Teng J (2015) A dynamic Bayesian network based approach to safety decision support in tunnel construction. *Reliability Engineering & System Safety* 134 (0):157-168.
- [72] Modarres, M., Kaminskiy, M., Krivtsov, V., 1999. *Reliability engineering and risk analysis*. Marcel Dekker, New York.
- [73] Øien, K., 2001. A framework for the establishment of organizational risk indicators. *Reliability Engineering and System Safety* 74, 147–168.

- [74] Kim, M.C., Seong, P.H., 2006. A computational method for probabilistic safety assessment of I&C systems and human operators in nuclear power plants. *Reliability Engineering and System Safety* 91 (5), 580–593.
- [75] Kim, M.C., Seong, P.H., Hollnagel, E., 2006. A probabilistic approach for determining the control mode in CREAM. *Reliability Engineering and System Safety* 91 (2), 191–199.
- [76] Cornalba, C., Giudici, P., 2004. Statistical models for operational risk management. *Physica A* 338, 166–172.
- [77] Bayraktarli, Y. Y. (2009). Construction and application of Bayesian probabilistic networks for earthquake risk management (Doctoral dissertation, University of Karlsruhe).
- [78] Straub D. (2005). Natural hazards risk assessment using Bayesian networks. In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 05)*, Rome, Italy, June 19–23.
- [79] Lee, C., Lee, K.J., 2006. Application of Bayesian network to the probabilistic risk assessment of nuclear waste disposal. *Reliability Engineering and System Safety*. 91, 515–532.
- [80] Norrington, L., Quigley, J., Russel, A., Van der Meer, R., 2007. Modeling the reliability of search and rescue operations with Bayesian Belief Networks. *Reliability Engineering and System Safety* 93 (7), 940–949.
- [81] Trucco, P., Cagno, E., Ruggeri, F., Grande, O., 2008. A Bayesian belief network modelling of organisational factors en risk analysis: a case study in maritime transportation. *Reliability Engineering and System Safety* 93 (6), 845–856.
- [82] Røed, W., Mosleh, A., Vinnem, J.E., Aven, T., 2008. On the use of hybrid causal logic method in offshore risk analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2), 445–455.
- [83] Duijm, N.J., 2009. Safety-barrier diagrams as a safety management tool. *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2), 332–341.
- [84] Léger, A., Weber, P., Levrat, E., Duval, C., Farret, R., Iung, B., 2009. Methodological developments for probabilistic risk analyses of socio-technical systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* 223 (4/2009), 313–332.
- [85] Hanea, D., Ale, B., 2009. Risk of human fatality in building fires: a decision tool using Bayesian networks. *Fire Safety Journal* 44 (5), 704–710.
- [86] Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2013). Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A Bayesian approach. *Safety science*, 57, 108-117.

- [87] Abimbola, M., Khan, F., Khakzad, N., & Butt, S. (2015). Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. *Safety science*, 76, 133-144.
- [88] Chateaufneuf, A., & Laggoune, R. (2016). Bayesian approach for the reliability assessment of corroded interdependent pipe networks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 148, 46-58.
- [89] Song Y, Gong J, Gao S, Wang D, Cui T, Li Y, Wei B (2012) Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: A case study in Beichuan, China. *Comput Geosci-uk* 42 (0):189-199.
- [90] Korb KB, Nicholson AE (2004) *Bayesian Artificial Intelligence*. CRC Press, London.
- [91] Informations fournis par le personnel du département de sécurité, complexe de liquéfaction du gaz naturel SONATRACH, Skikda.
- [92] EXPERTS HSE DE SONATRACH, Etude de dangers NOUVEAU TRAIN DE GNL, Skikda, révision 1, 2011, 84 pages.
- [93] Dey, P. (2003). "Analytic Hierarchy Process Analyzes Risk of Operating Cross-Country Petroleum Pipelines in India." *Nat.Hazards Rev.*, 4(4), 213-221.
- [94] Dey, P. K. (2004). "Decision support system for inspection and maintenance: a case study of oil pipelines." *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 51(1), 47-56.
- [95] Dey, P. K., Ogunlana, S. O., and Naksuksakul, S. (2004). "Risk-based maintenance model for offshore oil and gas pipelines: A case study." *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 10(3), 169-183.
- [96] Han, Z. Y., and Weng, W. G. (2010). "An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network." *J Loss Prev Process Ind*, 23(3), 428-436.
- [97] Han, Z. Y., and Weng, W. G. (2011). "Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network." *J.Hazard. Mater.*, 189 (1–2), 509-518.
- [98] EGIG. (1999). "European Gas Pipeline Incident Data Group." Rep. No. Fourth Report 1970e1998, Gas Pipeline Incidents.
- [99] Infraguide. (2006). "Decision Making and Investment Planning: Managing Risk." Rep. No. 10, Federation of Canadian Municipalities, Ottawa.
- [100] DNV. (2009). "Integrity Management of Submarine Pipeline Systems." Rep. No. DNVRP-F116, Det Norske Veritas, Norway.
- [101] DNV. (2010). "Risk Assessment of Pipeline Protection." Rep. No. DNV-RP-F107, Det Norske Veritas, Norway.

- [102] Muhlbauer, W. K. (2004). Pipeline Risk Management Manual: Ideas, Techniques, and Resources. Gulf Professional Publishing, Elsevier.
- [103] Yuhua, D., and Datao, Y. (2005). "Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis." *J Loss Prev Process Ind*, 18(2), 83-88.
- [104] Dawotola, A. W., Gelder, P. H. A. J. M. v., and Vrijling, J. K. (2009). "Risk Assessment of Petroleum Pipelines Using a Combined Analytical Hierarchy Process – Fault Tree Analysis (AHP-FTA)." *Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop*, Delft University of Technology, Delft, 1-11.
- [105] Shahriar, A., Sadiq, R., and Tesfamariam, S. (2012). "Risk analysis for oil & gas pipelines: A sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis." *J Loss Prev Process Ind*, 25(3), 505-523.
- [106] Parvizsedghy, L., and Zayed, T. (2013) "Predictive Risk-Based Model for Oil and Gas Pipelines." *Canadian Society of Civil Engineering 2013 Annual Conference*, Montreal, Canada, May 29- June 3.
- [107] PHMSA (2014a). "Pipeline & Hazardous Materials Safety Administration." <http://primis.phmsa.dot.gov/comm/PipelineBasics.htm?nocache=1984> (February/01, 2014).
- [108] EGIG (2004) European Gas Pipeline Incident Data Group. Rep. No. Six Report 1970e2004, Gas Pipeline Incidents.
- [109] Caleyó, F., Velázquez, J. C., Valor, A., and Hallen, J. M. (2009). "Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground pipelines: A Monte Carlo study." *Corros.Sci.* 51(9), 1925-1934.
- [110] Sinha, S. K., and Pandey, M. D. (2002). "Probabilistic Neural Network for Reliability Assessment of Oil and Gas Pipelines." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 17 320-329.
- [111] Ahammed, M. (1998). "Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects." *Int.J.Pressure Vessels Piping*, 75(4), 321- 329.
- [112] Kiefner, J. F., Maxey, W. A., Eiber, R. J., and Duffy, A. R. (1973). "Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders." *American Society for Testing and Materials*, 461 481.
- [113] Noor, N. M. D., Ozman, N. A. N., and Yahaya, N. (2011). "Deterministic Prediction of Corroding Pipeline Remaining Strength in Marine Environment Using DNV RPF101 (Part A)." *Journal of Sustainability Science and Management*, 6(1), 67-78.
- [114] Al-Khalil, M., Assaf, S., and Al-Anazi, F. (2005). "Risk-Based Maintenance Planning of Cross-Country Pipelines." *J.Perform.Constr.Facil.*, 19(2), 124-131.

- [115] Zeng, C., and Ma, B. (2009). "Analytic Mode for Predicting the Failure risk of pipeline System." ICPTT 2009, ASCE, 17-27.
- [116] Bersani, C., Citro, L., Gagliardi, R. V., Sacile, R., and Tomasoni, A. M. (2010). "Accident occurrence evaluation in the pipeline transport of dangerous goods." *Chemical Engineering Transactions*, Pages 249-254.
- [117] Ren, C., Qiao, W., and Tian, X. (2012). "Natural Gas Pipeline Corrosion Rate Prediction Model Based on BP Neural Network." B. Cao, and X. Xie, eds. Springer Berlin Heidelberg, 449-455.
- [118] Menon, E. S. (2005). *Gas Pipeline Hydraulics*. CRC Press (Taylor and Francis Group), Boca Raton, FL.
- [119] Teixeira, A. P., Guedes Soares, C., Netto, T. A., and Estefen, S. F. (2008). "Reliability of pipelines with corrosion defects." *Int.J.Pressure Vessels Piping*, 85(4), 228-237.
- [120] Feng, Y., Wang, T., Yan, X., and Yang, X. (2011). "Numerical Simulation Research on the Reliability of Oil/Gas Pipelines Based on Semi-Analytical Method." American Society of Civil Engineers, 188-199.
- [121] Sahraoui, Y., Khelif, R., & Chateauneuf, A. (2013). Maintenance planning under imperfect inspections of corroded pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 104, 76-82.
- [122] Nahal, M., Khelif, R., Bourenane, R., & Salah, S. (2015). Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40 (11), 3273-3283.
- [123] Bertolini, M., and Bevilacqua, M. (2006). "Oil pipeline spill cause analysis: A classification tree approach." *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(2), 186-198.
- [124] Davis, P. M., Dubois, J., Gambardella, F., Sanchez-Garcia, E., and Uhlig, F. (2010). "Performance of European Cross-Country Oil Pipelines." Rep. No. Report No. 8/11, CONCAWE, Brussels.
- [125] Liao, K., Yao, Q., Wu, X., and Jia, W. A. (2012). "A Numerical Corrosion Rate Prediction Method for Direct Assessment of Wet Gas Gathering Pipelines Internal Corrosion." *Energies*, 5 3892-3907.
- [126] Senouci, A., Elabbasy, M., Elwakil, E., Abdrabou, B., and Zayed, T. (2013). "A model for predicting failure of oil pipelines." *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-13.
- [127] Senouci, A., El-Abbasy, M., and Zayed, T. (2014). "Fuzzy-Based Model for Predicting Failure of Oil Pipelines." *J. Infrastructure Systems*, 20(4), 04014018.

- [128] El-Abbasy, M.S., Senouci, A., Zayed, T., & Mosleh, F. (2014a). A condition assessment model for oil and gas pipelines using integrated simulation and analytic network process. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11, 263–281.
- [129] El-Abbasy, M., Senouci, A., Zayed, T., Mirahadi, F., and Parvizsedghy, L. (2014b). "Condition Prediction Models for Oil and Gas Pipelines Using Regression Analysis." *J. Constr. Eng. Manage.*, 140(6), 04014013.
- [130] El-Abbasy, M.S., Senouci, A., Zayed, T., Mirahadi, F. and Parvizsedghy, L. (2014c), "Artificial neural network models for predicting condition of offshore oil and gas pipelines", *Automation in Construction*, Vol. 45, pp. 50-65.
- [131] Sadiq, R., Husain, T., Veitch, B., and Bose, N. (2004). "Risk-based decision-making for drilling waste discharges using a fuzzy synthetic evaluation technique." *Ocean Eng.*, 31(16), 1929-1953.
- [132] Restrepo, C. E., Simonoff, J. S., & Zimmerman, R. (2009). Causes, cost consequences, and risk implications of accidents in US hazardous liquid pipeline infrastructure. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2(1), 38-50.
- [133] Simonoff, J. S., Restrepo, C. E., and Zimmerman, R. (2010). "Risk management of cost consequences in natural gas transmission and distribution infrastructures." *J Loss Prev Process Ind*, 23(2), 269-279.
- [134] Brito, A. J., and de Almeida, A. T. (2009). "Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines." *Reliab.Eng.Syst.Saf.*, 94(2), 187-198.
- [135] EGIG (2008) European Gas Pipeline Incident Data Group. Rep. No. 7th Report 1970e2007, Gas Pipeline Incidents.
- [136] Sklavounos, S., and Rigas, F. (2006). "Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines." *J Loss Prev Process Ind*, 19(1), 24-31.
- [137] Kanury, A. M. (1981). "Limiting case fires arising from fuel tank/pipeline ruptures." *Fire Safety Journal* 3(4): 215-226.
- [138] Zhang, M., et al. (2015). "Risk assessment for fire and explosion accidents of steel oil tanks using improved AHP based on FTA." *Process Safety Progress*.
- [139] Aqlan, F., Ali, E, M., 2014. Integrating lean principles and fuzzy bow-tie analysis for risk assessment in chemical industry. *Journal of loss prevention in the process industries* 29: 39-48.
- [140] Zhang, L., Wu,X., Miroslaw, J,S., Zhong, J., Lu,Y., 2014. Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects. *Reliability Engineering & System Safety* 131: 29-39.

- [141] Aiyou, W., Shiliang, S., Runqiu, L., Deming, T., Xiafang, F., 2014. City Fire Risk Analysis based on Coupling Fault Tree Method and Triangle Fuzzy Theory. *Procedia Engineering* 84: 204-212.
- [142] Alvares, N. J. and H. K. Hasegawa (1980). "Fire hazard analysis for fusion energy experiments." *Fire Safety Journal* 2(3): 191-211.
- [143] Liu, W, S., Li, S, B., Tang., Rui. 2013. Slope Stability Evaluation in Open Pit Based on Bayesian Networks. *Proceedings of the 2012 International Conference on Communication, Electronics and Automation Engineering*, Springer.
- [144] Mustafa, S., et al. (2015). "Bayesian probabilistic approach for model updating and damage detection for a large truss bridge." *International Journal of Steel Structures* 15(2): 473-485.
- [145] Cho, T., et al. (2010). "Fatigue reliability analysis for the crack propagation compared with LRFD specification." *International Journal of Steel Structures* 10(1): 35-49.
- [146] Wang, Y. F., Xie, M., Ng, K, M., Habibullah, M, S., 2011. Probability analysis of offshore fire by incorporating human and organizational factor. *Ocean Engineering* 38(17): 2042-2055.
- [147] Lin, Y., Chen, M., Zhou, D., 2013. Online probabilistic operational safety assessment of multi-mode engineering systems using Bayesian methods. *Reliability Engineering & System Safety* 119: 150-157.
- [148] Martin, J. E., Rivas, T., Matías, J, M., Taboada, J., Argüelles, A., 2009. A Bayesian network analysis of workplace accidents caused by falls from a height. *Safety Science* 47(2): 206-214.
- [149] Ko, B., et al. (2010). "Early fire detection algorithm based on irregular patterns of flames and hierarchical Bayesian Networks." *Fire Safety Journal* 45(4): 262-270.
- [150] Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Information and control* 8(3): 338-353.
- [151] Tyagi, S. K., Panday, D., Tyagi, R., 2010. Fuzzy set theoretic approach to fault tree analysis. *International Journal of Engineering, Science and Technology* 2(5): 276-283.
- [152] Onisawa, T., 1988. An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. *Fuzzy Sets and Systems* 27(2): 87-103.
- [153] Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., 2011. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering & System Safety* 96(8): 925-932.

- [154] Commission, N. R. (1975). Reactor safety study. An assessment of accident risks in US commercial nuclear power plants. Appendix XI. Analysis of comments on the draft WASH-1400 report, Nuclear Regulatory Commission.
- [155] Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2013). Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(1), 46-53.
- [156] Bobbio, A., Portinalea L., Minichinob M., Ciancamerla E., 2001. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety* 71(3): 249-260.
- [157] Agena-Risk Software Version 6.1, 2014. <http://www.agenarisk.com>.

ANNEXES

