



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle



Département : Sécurité industrielle et environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et sécurité industrielle
Spécialité : Sécurité intervention et prévention.

Evaluation quantitative du risque d'explosion d'un pipe

Réalisé par :

ALI ABDELDJALIL et KEDDAR MOHAMED NADJIB

Présenté et soutenu publiquement par :

AISSANI Nassima	MCA	IMSI	Présidente
BENOMAR Fatima	MAA	IMSI	Encadrant
SERAT Fatima Zohra	MCB	IMSI	Examinatrice

Année 2021 /2022

Résumé :

Un pipeline est un ouvrage destiné à transporter, sous pression et sur de grandes distances, des matières fluides (liquides, gaz, mélanges polyphasiques). L'objectif principal de cette recherche est d'élaborer un modèle probabiliste axé sur les risques liés au transport de gaz naturel. Ce modèle développe un outil de prédiction de probabilité d'occurrence d'explosion d'un pipe.

Afin de donner de l'importance à ce travail de recherche, une étude analytique a été réalisée en utilisant l'une des méthodes classiques d'analyse des risques représenté dans l'arbre de défaillance afin de déterminer l'enchaînement des événements qui conduisent à l'occurrence d'une l'explosion du pipe, et d'extraire les facteurs d'importance par la modélisation et l'analyse quantitative et ce avec l'aide du programme isograph.

À l'issue de ce travail, un réseau bayésien a été développé pour définir des connaissances plus précises et extraire un ensemble de probabilités posteriori, les facteurs de Birnbaum et facteur de criticité pour les événements par l'utilisation de l'inférence, et à la fin une tentative de comparer les résultats avec ceux que nous avons trouvé dans l'arbre des défaillances en ce qui concerne les facteurs d'importance, en utilisant logiciel Agena.

Tous ces travaux visent principalement à trouver les causes les plus importantes qui affectent grandement l'émergence de ce type d'accident et à essayer de mettre en place des mesures préventives pour éviter ce type de risque.

Mots-clés : *pipeline, Analyse Quantitative des risques, ADD, Réseaux Bayésien, Inférence bayésienne, Facteurs d'importance probabilistes, EXPLOSION.*

المخلص:

خط الأنابيب عبارة عن هيكل يهدف إلى نقل المواد السائلة (السوائل والغازات والمخاليط متعددة الأطوار) تحت الضغط وعلى مسافات كبيرة. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تطوير نموذج احتمالي يركز على المخاطر المرتبطة بنقل الغاز الطبيعي. يطور هذا النموذج أداة التنبؤ باحتمالية انفجار الأنابيب ولإعطاء أهمية لهذا العمل البحثي، تم إجراء دراسة تحليلية باستخدام إحدى الطرق التقليدية لتحليل المخاطر المتمثلة في شجرة الصدع من أجل تحديد سلسلة الأحداث التي أدت إلى حدوث انفجار. الأنابيب، واستخراج إيزوغراف العوامل ذات الأهمية من خلال النمذجة والتحليل الكمي بمساعدة برنامج

نتيجة لهذا العمل، تم تطوير شبكة بايز لتحديد معرفة أكثر دقة واستخراج مجموعة من الاحتمالات اللاحقة، وعوامل بيرنباوم وعامل الأهمية الحرجية للأحداث من خلال استخدام الاستدلال، وفي النهاية محاولة مقارنة أجيال النتائج بتلك. وجدنا في شجرة الخطأ فيما يتعلق بالعوامل ذات الأهمية. باستخدام برنامج كل هذا العمل يهدف بشكل أساسي إلى إيجاد أهم الأسباب التي تؤثر بشكل كبير على ظهور هذا النوع من الحوادث ومحاولة اتخاذ تدابير وقائية لتجنب هذا النوع من المخاطر

الكلمات المفتاحية: التحليل الكمي للمخاطر، ادد، شبكات بايز، الاستدلال البايزي، عوامل الأهمية الاحتمالية، الانفجار، خط الأنابيب

Abstract:

A pipeline is a structure intended to transport, under pressure and over great distances, fluid materials (liquids, gases, multiphase mixtures). The main objective of this research is to develop a probabilistic model focused on the risks associated with natural gas transport. This model develops a pipe explosion probability prediction tool.

In order to give importance to this research work, an analytical study was carried out using one of the traditional methods of analysis of the risks represented in the fault tree in order to determine the chain of events which lead to the occurrence of the EXPLOSION of the pipe, and to extract the factors of importance by modeling and quantitative analysis with the help of the isograph program.

As a result of this work, a Bayesian network was developed to define more precise knowledge and extract a set of posterior probabilities, Birnbaum factors and criticality factor for events through the use of inference, and to the end an attempt to compare the results with those we found in the fault tree with respect to the factors of importance. By using Agena software.

All this work is mainly aimed at finding the most important causes that greatly affect the emergence of this type of accident and at trying to put in place preventive measures to avoid this type of risk.

Keywords: Quantitative Risk Analysis, Bayesian Networks, Bayesian Inference, Probabilistic Importance Factors, EXPLOSION, pipeline.

Remerciements :

Nous tenons à remercier premièrement Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Nous tenons également à exprimer notre vif remerciement à notre encadrant Mme. Benomar Fatima, pour avoir d'abord proposé ce thème et suivi le déroulement de ce mémoire et pour la confiance et l'intérêt qu'elle nous a accordé tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons à citer dans ces remerciements les membres du jury qui ont bien voulu examiner et juger notre travail.

Nous remercions tous nos professeurs de l'IMSI qui ont contribué à notre formation.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Ali Abdeldjallil & keddar Mohamed.N
Merci

Dédicace :



Je dédie ce travail :

À ALLAH le tout-puissant à qui je dois tout

À mes chers parents et ma sœur, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À toute fokara de zaouia belgaidia pour leur encouragement permanent et leur soutien moral.

À et mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

À tous mes professeurs : Leur générosité et leur soutien m'oblige de leur témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

À ma sœur

KEDDAR.A

Table des matières

- i. Résumé**
- ii. Remerciements**
- iii. Dédicace**
- iv. Table des matières**
- v. Liste des figures**
- vi. Liste des tableaux**
- vii. Principale abréviation**

Chapitre I: Généralités sur les pipelines de transport de pétrole et de gaz naturel.....	
I.1 Introduction :	1
I.2 Définition :	1
I.3 Historique de pipeline.....	2
I.4 Les caractéristiques de la canalisation.....	3
I.5 Avantages de transport par pipeline :	3
I.6 Problèmes de transport par pipeline :	4
I.7 Mise en place d'un système pipelines	5
I.7.1 Planification et conception.....	5
I.7.2 la planification préalable à la construction	6
I.7.3 Mise en service et exploitation.....	6
I.7.4 Cessation d'exploitation (ou désaffectation).....	6
I.7.5 Conceptions et normes des pipelines	7
I.8 Causes de développement des transports par pipeline :	7
I.9 Types de pipeline :	8
I.10 Réseau de transport des hydrocarbures par canalisation en Algérie	10

CHAPITRE II :	12
<i>Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance</i>	12
II .1 Introduction	13
II .2 Définition de risque	13
II .3 Gazoduc :	14
II .3.1 Causes de défaillance de pipeline gazoduc :	15
II .3.2 Composants d'un système de transport par pipeline	16
II .3.3 le transport gazoduc du gaz naturel	20
II .3.4 le risque lié au transport par canalisation gazoducs :	21
II .3.5 Exemple d'accidents d'un gazoduc déroulé à travers le monde	21
II .4 Oléoduc :	23
II .4 .1 le transport oléoduc du pétrole brut	23
II .4 .2 Terminal de départ et d'arrivée Terminal de départ	24
II .4 .3 Les types de montage des oléoducs	25
II .4 .4 Stations de pompage	25
II .4 .5 Une station de pompage est constitué principalement de :	25
II .4 .6 Le Centre de Dispatching d'Hydrocarbures Liquides (CDHL) :	26
II .4 .7 Les risques liés au transport de l'oléoducs	26
II .4 .8 Défaillances dans les ouvrages de pipelines	27
II .4 .9 Exemple d'accidents d'un oléoduc déroulé à travers le monde :	28
II .5 Corrosion	29
II .5 .1 Types de corrosion	29
II .5.2 Fissuration des pipelines	30
II .5.3 Défaillances par rupture fragile	30
II .5.4 Défaillances par rupture ductile	31
II .6 Les éraflures :	32
II .7 Les Enfoncements	33
II .8 Sécurité industrielle du transport par pipeline	35
II .9 Maintenance et réparation des pipelines	36
II .9 .1 Introduction	36

II .9 .2 Maintenance.....	36
PARTIE PRATIQUE.....	48
Chapitre I : L'arbre de défaillance.....	48
I.1 Introduction et définitions	49
I.2 Cohérence des arbres de défaillance	53
I. 3 Symboles utilisés dans l'arbre de défaillance	57
Chapitre II :	60
L'approche Bayésienne et son rôle dans l'évaluation des risques	60
II.1 Introduction	61
II.2 Principes de base du raisonnement sous incertitude.....	61
II.2.1 Herbe humide.....	61
II.2.2 Expliquer loin	62
II.2.3 Dépendance des événements	62
II.2.4 Certitudes antérieures	63
II.3 Réseaux causaux.....	63
II.4 Calcul de probabilité.....	66
II.4.1 Calcul de probabilité de base.....	66
II.4.2 Probabilités subjectives	68
II.4.3 Indépendance conditionnelle	69
II.5 Réseaux bayésiens	69
II.5.1 La règle de la chaîne	71
II.5.2 Raisonnement évident.....	71
II.5.3 Les réseaux bayésiens et la fonctionnalité d'un cerveau humain.....	72
II.6 Applications des réseaux bayésiens	73
II.7 Étapes de modélisation d'un réseau bayésien.....	76

II.7 .1 Convertir Arbre de défaillance à Réseau bayésien :	77
II.7 .2 Concernant la partie qualitative du RB :	77
II.7 .3 Concernant la probabilité, la partie quantitative du RB :	78
CHAPITRE III :	80
Application l'étude de cas	80
III .1 introduction	81
III .2 réseaux de transport des hydrocarbures par canalisation	82
III.2.1 Construction de l'arbre de défaillance pour l'explosion d'un pipeline	84
III 2.2 La logique floue.....	86
III.2.1 Description des causes de l'explosion d'un pipe.....	87
III.3 présentation logiciel Isograph Reliability Workbench. Version	14.0.
Incorporating Fault Tree+	89
III.3.1 FONCTIONNALITÉS ET CARACTÉRISTIQUES DU LOGICIEL ISOGRAPH RELIABILITY WORKBENCH	89
III3.2 Arbre de défaillance avec logiciel isograph	90
III 3 .3 Les évènement de base qui conduisent à l'explosion des pipes	100
III.3.4 Les barrières de sécurité	102
III.4 Résultats et discussion	107
Conclusion	108
Conclusion générale	109
Bibliographie :	130
Annexe	138

Liste des Figures :

Figure 1 : canalisation des hydrocarbures	1
Figure 2 : La première utilisation connue de pipelines pour le transport	2
Figure 3 : pipelines gazoduc	8
Figure 4 : pipelines oléoduc.....	9
Figure 5 : Système de transport des hydrocarbures par canalisation.....	9
Figure 6 : Cartographie actuelle du Réseau de Transport	10
Figure 7 : Schéma de système gazoduc	15
Figure 8 : vannes.....	17
Figure 9 : Gares de racleurs.....	18
Figure 10 : stations de compression de gaz	18
Figure 11 : postes de détente haute pression	19
Figure 12 : bacs à toit fixe	19
Figure 13 : bacs à toit flottant.....	19
Figure 14 : Carte du Réseau de Transport du GAZ naturel.....	20
Figure 15 : Rupture et inflammation de BELGIQUE – GHISLENGHIEN	22
Figure 16 : Carte du Réseau de Transport du pétrole brut	24
Figure 17 : Une stations de pompage	26
Figure 18 : causes des incidents significatifs des pipelines.....	27
Figure 19 : corrosion dans la pipe (a) : internes (b) : externe.....	29
Figure 20 : corrosion par piqûration	30
Figure 21 : Fissuration par corrosion sous contrainte.....	30
Figure 22 : Modes de ruptures.....	31
Figure 23 : Éraflure.....	32
Figure 24 : Lieu d'accident d'explosion de pipeline en Belgique (été 2004).....	33
Figure 25 : Photo d'un pipeline enfoncé	34
Figure 26 : Géométrie d'un enfoncement.....	34
Figure 27 : Les trois secteurs technologiques impliqués dans l'inspection et la maintenance du pipeline en service	41
Figure 28 : Examen visuel.....	43
Figure 29 : Le principe de détection par ultrasons	43
Figure 30 : Géométrie de demi-coquilles	45

Figure 31 : Opération de soudages de demi coquilles (STT)	46
Figure 32 : Réparation par clockspring	47
Figure 33 : Exemple simple d'arbre de défaillance	53
Figure 34 : Un modèle graphique pour l'herbe humide	63
Figure 35 : Connexions en série, divergentes et convergentes respectivement.....	64
Figure 36 : Un graphe acyclique dirigé	70
Figure 37 : Organigramme représentent un algorithme simplifié pour représenter un arbre de défaillance au réseaux bayésiens	77
Figure 38 : Les événements de base B1, B2, B3 et B4 correspondent aux nœuds racines	78
Figure 39 : Composants du réseau de pipelines	83
Figure 40 : arbre de défaillance avec logiciel isograph (arbre principal).....	91
Figure 41 : arbre de défaillance avec logiciel isograph [GT3(rupture)].....	92
Figure 42 : arbre de défaillance avec logiciel isograph [GT4(corrosion)]	93
Figure 43 : arbre de défaillance avec logiciel isograph [GT7 (défaut de tube)].....	94
Figure 44 : arbre de défaillance avec logiciel isograph [A (sources d'ignition)].....	95
Figure 45 : arbre de défaillance GT3 feu ouvert de la source d'ignition avec logiciel isograph	96
Figure 46 : arbre de défaillance GT4 étincelles de foudre de la source d'ignition porte [A] avec logiciel isograph	97
Figure 47 : arbre de défaillance amincissement par corrosion porte [C] avec logiciel isograph.....	98
Figure 48 : arbre de défaillance d'étincelle statique porte [D] avec logiciel isograph.....	99
Figure 49 : Echelle floue des possibilités des évènements basiques	100
Figure 50 : évènement de base dans le logiciel Agena.....	105
Figure 51 : Table de probabilités conditionnelles du Feu et explosion des pipelines	106
Figure 52 : Probabilité d'occurrence du Feu et explosion des pipelines, N2 et N3	106
Figure 53 : Probabilité d'occurrence des conséquences de Feu et explosion des pipelines Grâce aux résultats obtenus	107

Liste des Tableaux :

Tableau 1: Exemple fonctionnel du réseau de transport par canalisation en Algérie.....	11
Tableau 2: Résumé des causes principales de défaillance de gazoducs	16
Tableau 3 : La table de vérité booléenne.....	54
Tableau 4 : Symboles utilisés dans l'arbre de défaillance	57
Tableau 5 : Table de probabilités conditionnelles correspondant à une porte ET.....	78
Tableau 6 : Table de probabilités conditionnelles correspondant à une porte OÙ.....	79
Tableau 7 : Tous les événements de l'arbre de défaillance.....	84
Tableau 9 : Augments d'experts et valeurs de probabilité pour tous les évènements de base.....	102
Tableau 10 : Les probabilités d'occurrence des conséquences sont présentées au tableau.....	107

Principales abréviations :

- ADD : arbre de défaillance
- ADE : arbre des évènements
- Base ARIA : Analyse, recherche et information sur les accidents
- BARPI : Bureau d'Analyse des Risques et Pollution Industriels
- CM : Coupe minimale
- CNDG : Centre National de Dispatching Gazes
- CNDL : Centre National de Dispatching liquide
- CEI : commission électrotechnique internationale
- ES : évènement sommet
- ER : évènement redouté
- EB : évènement de base
- FEP : Feu et explosion des pipelines
- INRS : l'Institut national de Recherche et de Sécurité
- ISO : Organisation internationale de normalisation (International Organisation for Standardisation)
- MTEP : Million de tonnes équivalent pétrole
- OREDA: Offshore and Onshore Reliability Data: Données de fiabilité offshore et onshore
- Poc : Probabilité d'occurrence
- RB : réseaux bayésiens
- REX : Retour d'expérience
- STC : Systèmes de Transport par Canalisation
- TPC : Table de probabilités conditionnelles
- TPS : test périodique simple

Introduction générale :

Les hydrocarbures (pétrole et gaz naturel) se sont formés il y a des millions d'années et sont cachés au plus profond du sous-sol terrestre. Ils doivent leur nom à leur composition moléculaires d'hydrogène et carbone, ce sont les sources d'énergie non renouvelable les plus demandés.

Ils sont utilisés dans le quotidien, tant par le particulier, le consommateur que les groupes industriels. Ils sont une matière première incontournable pour la fabrication d'éléments précieux à usage quotidien tels que les plastiques, vêtements et médicaments (objets sans lesquels le mode de vie serait impensable).

Outre leur utilisation dans le quotidien, ils sont utilisés comme carburant qui alimente le transport (Avion, camion, voiture), comme combustible dans le chauffage domestique et source de chaleur dans l'industrie.

L'industrie des hydrocarbures est considérée parmi les activités économiques les plus rentables dans le monde. En Algérie, c'est le pilier de l'économie (L'Algérie possède environ 1% des réserves mondiales de pétrole et 3% de gaz).

Leur acheminement vers les différents consommateurs des lieux d'extraction vers les lieux de transformation se fait grâce à des canalisations ou pipes. Ce mode de transport traverse des milliers voir des millions de kilomètres de chemins pour arriver aux industries.

Un pipeline est un ouvrage destiné à transporter, sous pression et sur de grandes distances, des matières fluides (liquides, gaz, mélanges polyphasiques). C'est un système industriel constitué de tubes et d'accessoires (robinets, vannes, compresseurs...), souvent organisés en réseau.

Le mode de transport par canalisation coopère sensiblement à la réduction à la fois des coûts, des délais de livraison, du trafic routier et assurent aussi des transports massifs d'hydrocarbures, en veillant au respect de l'environnement avec des conditions les plus strictes de sécurité.

Il est considéré comme le moyen de transport de matière dangereuse le plus sûr en comparant avec les autres modes de transport (routier, maritime, fluviale et par aéronefs). Mais néanmoins, il présente des risques pour l'environnement et la population. Ces risques sont rares mais très graves. 60% de ces risques sont causés par des tiers (travaux à proximité d'un pipeline), par exemple l'accident de Ghislenghien en Belgique le 30 juillet 2004 est dû à cette cause. Les autres causes sont la corrosion externe ou interne, les défauts de matière ou de soudage, les fuites sur joints ou brides, les réactions chimiques, etc.

En Algérie, L'explosion du gazoduc Hassi-R'mel Arzew le 20 octobre 2006 suite à une fuite à causer des dizaines de blessés parmi les riverains de Mohammadia wilaya de Mascara.

Introduction générale

Dans cette même wilaya un autre gazoduc explose le 13 juillet 2021 ne causant que de dégâts mineurs et dont la principale cause, des travaux à proximité par un agriculteur.

Le but de ce mémoire est de modéliser le risque d'explosion des pipes par les arbres de défaillances et les réseaux bayésiens.

Le mémoire est organisé comme suit :

Partie théorique :

- CHAPITRE 1 : Généralités sur les pipelines de transport de pétrole et de gaz naturel
- CHAPITRE 2 : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

Partie pratique :

- CHAPITRE 1 : L'arbre de défaillance (ADD)
- CHAPITRE 2 : L'approche Bayésienne et son rôle dans l'évaluation des risques
- CHAPITRE 3 : Application l'étude de cas

PARTIE THEORIE

CHAPITRE I :

Généralités sur les pipelines de transport de pétrole et de gaz naturel

I.1 Introduction :

Actuellement le mode de transport par pipeline a connu une ample importance à l'échelle nationale comme à l'échelle internationale, qui s'explique par une hausse des quantités des produits transportés et des consommations en énergie. Cette situation exige des entreprises de développer davantage leur logistique, voire même de varier leur mode de transport afin de garantir un approvisionnement régulier, pour faire face à la progression de la demande sur le marché. Les pipelines sont les principaux moyens de transport des hydrocarbures, des puits de forage et complexes de raffinage vers les centres de distribution.[1]

I.2 Définition :

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant les hydrocarbures, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, en zone de risque sismique ou l'instable. Au contraire de leur investissement initial, leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances. [2]



Figure 1 : canalisation des hydrocarbures

I.3 Historique de pipeline

Des réseaux d'aqueducs pour la collecte et la distribution d'eau potable et d'irrigation existent depuis les temps historiques les plus anciens. Certains de ces réseaux utilisaient déjà sur certains tronçons des canalisations maçonnées ou en bois ou en métal ductile (plomb, ...).

Au XIX^{ème} siècle, la civilisation industrielle a vu se développer des installations complexes (hauts fourneaux, usines à gaz, centrales de vapeur, etc.) qui comprenaient des systèmes de transports locaux par canalisations en fonte, bois, acier, céramique, d'ampleur modeste. [3]



Figure 2 : La première utilisation connue de pipelines pour le transport

À partir de 1860, les pipelines deviennent indispensables avec la révolution industrielle et le début de l'exploitation du pétrole. À Titusville en Pennsylvanie, l'exploitation des premiers gisements de pétrole provoque une véritable ruée vers l'or noir et très vite il faut trouver un moyen autre que des chalands ou le chemin de fer pour transporter par barils cette production massive.

Le premier concept industriel de transport par pipeline (canalisation sous pression) aurait été formulé par le Russe Dmitri Mendeleïev en 1863 suggérant l'utilisation de tubes en acier. Dès 1865 un premier oléoduc, de huit kilomètres en tubes vissés en fonte et d'un diamètre de 2", est construit et transportant 100 m³ de pétrole par jour. En 1878, un nouveau pipeline, de 170 kilomètres et d'un diamètre de 6", est construit avec la capacité de transport jamais atteinte de 1

500 m³ de pétrole par jour. Le russe Vladimir Choukhov pour la société Branobel (acronyme de Brothers Nobel), a construit l'un des premiers oléoducs en 1878-1880 près de Bakou. À la fin de ce siècle 1 800 km de canalisations étaient en exploitation.

Durant la première moitié du XXe siècle, l'évolution des techniques permet d'étendre notablement les réseaux de pipelines. L'utilisation de l'acier, de moyens de soudure plus performants et de nouvelles machines pour creuser le sol, permettent d'agrandir les lignes et de transporter en plus grande quantité. Ainsi, entre 1931 et 1947, les États-Unis voient la longueur de leur réseau d'oléoducs multipliée par six, atteignant 29 000 kilomètres.

Durant la seconde Guerre mondiale, l'Europe va elle aussi lancer de nombreux et importants projets de construction de pipelines afin d'assurer son ravitaillement en hydrocarbures ; notamment en 1942, à l'initiative des britanniques avec l'opération PLUTO, un oléoduc est construit sous la Manche.

En 1956 est inauguré le plus long pipeline du monde, « Djouba », de 4 000 kilomètres de longueur, reliant le Sud-Est de la Russie à l'Allemagne.

Au début des années 1960, la demande en gaz augmentant et la liquéfaction du gaz naturel étant mis au point, voit l'arrivée des premiers importants gazoducs. L'Italie, l'Angleterre, les Pays Scandinaves et les Pays-Bas découvrent sur leur territoire d'immenses champs gaziers et décident de les exploiter, tout comme l'URSS. Les contrats internationaux se multiplient, des gazoducs sont posés sur des milliers de kilomètres, principalement en Europe qui compte la moitié des gazoducs mondiaux.

En 2020, dans le monde, la longueur des pipelines est estimée à 2 000 000 kilomètres³, pour environ les deux tiers concernent les gazoducs, un tiers les oléoducs et marginalement les autres.[4]

I.4 Les caractéristiques de la canalisation

- Un grand diamètre qui arrive jusqu'à 56 et peut atteindre 64.
- La capacité maximale de transport.
- La pression de service élevée (jusqu'à 100 bars).
- Une grande longueur.
- L'épaisseur (variant de 6.35 mm à 23 mm).
- Le mode de pose (aérien ou souterrain).[5]

I.5 Avantages de transport par pipeline :

Un pipeline présente de nombreux avantages, dont certains sont décisifs, par rapport aux autres moyens de transport :

- Un mode de transport massif (Atteint 60 M. litres/Jour) par exemple.
- Un transport à haut degré de sécurité avec moins de deux incidents pour 10.000 Km de pipeline par an.
- Un approvisionnement sûr, insensible aux intempéries et aux conditions atmosphériques, fonctionnant 24 heures sur 24 sur tous les jours de l'année.
- Le mode de transport massif le moins cher sur moyenne et longue distance, ne nécessitant pas d'opération de manutention. [6]

I.6 Problèmes de transport par pipeline :

Le transport par canalisations est encore trop peu utilisé en tant que moyen de transport à part entière. Cela pose une série de problèmes, entre autres une sur utilisation des autres modes de transport.

- L'espace : chaque fois qu'une canalisation doit être placée, il faut chercher un tracé car il n'y a pas assez de place/d'espace prévu pour les pipelines dans les plans d'aménagements du territoire et il existe aussi des problèmes physiques aigus.

- Les travaux d'infrastructure pour la route, le rail et la voie d'eau sont généralement entièrement financés par de l'argent public alors que les entreprises qui veulent transporter leurs marchandises par pipelines doivent elles-mêmes en assumer les coûts.

- Le coût d'installation des canalisations (400.000 €/km pour de moyennes/petites canalisations) ainsi que leurs coûts opérationnels sont élevés. En conséquence, le return on investment (ROI) est inférieur aux hurdles ratés, et dans la majorité des cas, la période de play-back est de 15 ans. Ajoutez à cela un faible taux d'utilisation des capacités les premières années, et vous avez la liste des éléments qui constituent souvent un obstacle au développement rapide du réseau de pipelines.

- Les coûts de déplacements/déviations des canalisations sont un autre problème. Quand, pour une raison ou pour une autre, une canalisation doit être déplacée, c'est généralement à charge de l'entreprise qui utilise la canalisation en question.

- Un problème encore plus important est le manque de transparence et d'efficacité dans l'octroi des autorisations ainsi que le manque de cohérence entre les divers niveaux compétents. Des règles différentes sont en vigueur au sein des différentes régions, et même des sous-régions, et différentes instances entrent en jeu pour les différentes autorisations. [7]

I.7 Mise en place d'un système pipelines

I.7.1 Planification et conception

La planification commence plusieurs années avant le début de la construction, dès que le promoteur du pipeline juge ce dernier économiquement viable, sachant que des clients actuels ou potentiels ont besoin de transporter un produit. C'est au cours de cette première étape, qui vise à établir la portée du projet, qu'on estime les volumes de produit et qu'on définit le point de départ et d'arrivée du pipeline, afin de déterminer le diamètre de la conduite et le nombre d'installations en surface nécessaires.

On peut alors établir un tracé préliminaire et concevoir le pipeline au moyen des activités suivantes :

- Conversations et consultations avec des propriétaires fonciers, des collectivités locales et des groupes autochtones pour recueillir des commentaires en vue de sélectionner un tracé ;
- Sélection d'un tracé et détermination de la structure physique du pipeline ;
- Choix de l'emplacement des installations connexes, comme des stations de compression ;
- Évaluation des impacts éventuels sur l'environnement, des richesses historiques ainsi que de l'utilisation actuelle et traditionnelle des terres ;
- Conception technique initiale, p. ex. analyse de la structure et de la résistance du pipeline, choix des matériaux et évaluations des risques. [8].

Les demandes d'approbation contiennent toutes les informations pertinentes pour assurer l'organisme de réglementation que le projet est nécessaire, qu'il ne présente pas de dangers pour la population, que les consultations et les évaluations ont été menées en bonne et due forme, et qu'il repose sur des principes d'ingénierie solides. Ces documents portent sur :

- La trace proposée ;
- Les détails des consultations avec les propriétaires fonciers, les collectivités et les groupes autochtones ;
- La description du terrain et de l'environnement que le pipeline traversera.

Les promoteurs du pipeline définissent également les étapes visant à atténuer les effets sur l'environnement, comme la pollution sonore et lumineuse, le calendrier de construction et les mesures d'atténuation en période d'activités restreintes, les moyens de gestion des espèces envahissantes, la protection de l'usage des terres et des ressources à des fins traditionnelles par les Autochtones, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et les procédures de remise en état.

I.7.2 la planification préalable à la construction

Au cours des étapes de planification et de construction, il est particulièrement important que le promoteur applique des mesures préventives visant à éviter ou atténuer les effets environnementaux. Les méthodes exposées par écrit doivent maintenant être mises en œuvre pour veiller à ce que le pipeline réponde à l'ensemble des normes de sécurité et des exigences réglementaires.

Sur le plan technique, les promoteurs doivent s'assurer que le pipeline est conçu, construit et exploité conformément à la norme canadienne CSA Z662. [8].

I.7.3 Mise en service et exploitation

Le terme « mise en service » décrit le processus consistant à « brancher » le nouveau pipeline afin qu'il puisse transporter des produits. Cette étape a lieu après que le pipeline a été testé avec de l'eau, qu'on injecte à une pression au moins 25 % plus élevée que la pression d'exploitation maximum. Cette étape vise à confirmer l'absence de fuites.

Lors de l'étape d'exploitation, les activités d'ingénierie ont pour principal objectif de garantir l'intégrité du pipeline. On tient compte de plusieurs considérations environnementales, comme la réduction de la pollution sonore et lumineuse au cours des activités courantes, le contrôle de l'érosion et de la sédimentation, la conservation des espèces rares, la gestion des émissions atmosphériques, ainsi que les mesures d'atténuation et d'intervention en cas de contamination du sol et de l'eau. La gestion des urgences constitue également un aspect important. [8].

I.7.4 Cessation d'exploitation (ou désaffectation)

L'étape finale consiste à désaffecter le pipeline, c'est-à-dire à en cesser l'exploitation. La société exploitante doit décider si elle enlèvera totalement ou partiellement le pipeline, si elle le laissait sur place ou si elle opterait pour une combinaison de ces deux méthodes suivant les résultats de son évaluation des répercussions potentielles sur les terres, l'environnement et la sécurité, qu'elle mène en consultation avec les propriétaires fonciers.

Le cycle de vie des pipelines est un système compliqué qui requiert une expertise et des

ressources à la pointe de l'industrie. Il s'agit d'un processus essentiel pour continuer à transporter de manière sûre et responsable l'énergie dont dépend la qualité de vie des Canadiens et Canadiennes, et ce pendant les décennies à venir. [8].

I.7.5 Conceptions et normes des pipelines

La conception et la construction d'un pipeline est un procédé long et complet qui prend en considération divers facteurs et exige un certain nombre d'étapes et d'engagements avant que le produit commence à circuler. Ceci inclut un partenariat étendu avec les parties prenantes ainsi qu'un examen approfondi des sociaux et environnementaux facteurs.

Avant même de construire un pipeline, une analyse détaillée du tracé doit d'évaluer correctement les facteurs topographiques être faite dans le but environnementaux et sociaux spécifiques dont il faut tenir compte le long de l'emprise (bande de terre où se trouve le pipeline). [8]

I.8 Causes de développement des transports par pipeline :

Primo cause du développement des transports par pipeline est liée à l'accroissement de la consommation des hydrocarbures et à la part prépondérante qu'ils ont pris se dans l'approvisionnement des besoins énergétiques.

Secundo, caractéristique de l'économie du pétrole, tient à des besoins élevés en moyens de transport, car les lieux de production sont généralement très éloignés des centres de consommation.

Tertio cause doit être recherchée dans les avantages spécifiques du transport par conduite :

- Forme liquide et gazeuse des hydrocarbures, convenant parfaitement à l'acheminement par canalisation ;
- Pertes d'énergie minimales (frottement du liquide sur les parois) et contenant fixe (pas de tare ni de retour à vide) ;
- Trajet presque rectiligne (raccourcissement des distances par rapport aux moyens classiques : bateau, wagon) ;
- Insensibilité pratique au relief et aux conditions géographiques (traversée de montagnes, de fleuves, de déserts, de bras de mer) ;
- Emprise au sol quasiment nulle, autorisant les cultures et limitant les servitudes et les nuisances ;
- Parfaite continuité de marche (pas d'entrave atmosphérique ni climatique) ;
- Adaptation très marquée à l'automatisme (main-d'œuvre réduite par l'emploi de techniques d'automatisation très poussées). [9]

I.9 Types de pipeline : Dans le secteur de l'énergie, il existe deux grands types de pipelines :

- Les pipelines de liquides (oléoduc)
- Les pipelines gazoducs.

Les pipelines de liquides transportent du pétrole brut ou du gaz naturel sous forme de liquide vers les raffineries, où ils sont soumis à la distillation et à d'autres processus de production. Certains pipelines de liquides sont également utilisés pour transporter des produits pétroliers distillés, tels que l'essence, vers des centres de distribution. Les gazoducs sont utilisés uniquement pour le transport du gaz naturel vers des usines de traitement et pour la distribution. Le gaz naturel est aussi souvent acheminé directement aux foyers par le biais de pipelines. En plus de ces deux principaux types de pipelines, il en existe également quatre autres sous-catégories :

- **Pipelines de collecte :** Ces lignes ont un diamètre de 10 à 30 centimètres et servent à transporter du gaz naturel, du pétrole brut et des liquides de gaz naturel sur de courtes distances. Elles existent principalement pour collecter des produits depuis les puits et les déplacer pour le traitement.
- **Pipelines d'alimentation :** Les lignes d'alimentation transportent du pétrole brut, du gaz naturel et des liquides de gaz naturel des réservoirs de stockage et des installations de traitement vers les pipelines de transport.
- **Pipelines de transport :** leur diamètre peut varier de 10 centimètres à plus d'un mètre. Ils transportent du gaz naturel, des liquides de gaz naturel, du pétrole brut et des produits raffinés (selon qu'il s'agit de pipelines de liquides ou de gazoducs). Ces pipelines transportent des produits pétroliers sur de longues distances, y compris au-delà des frontières internationales.
- **Pipelines de distribution :** Ils ont un diamètre de 1 à 15 centimètres et sont utilisés pour distribuer du gaz naturel aux foyers et aux entreprises. [10]



Figure 3 : pipelines gazoduc



Figure 4: pipelines oléoduc

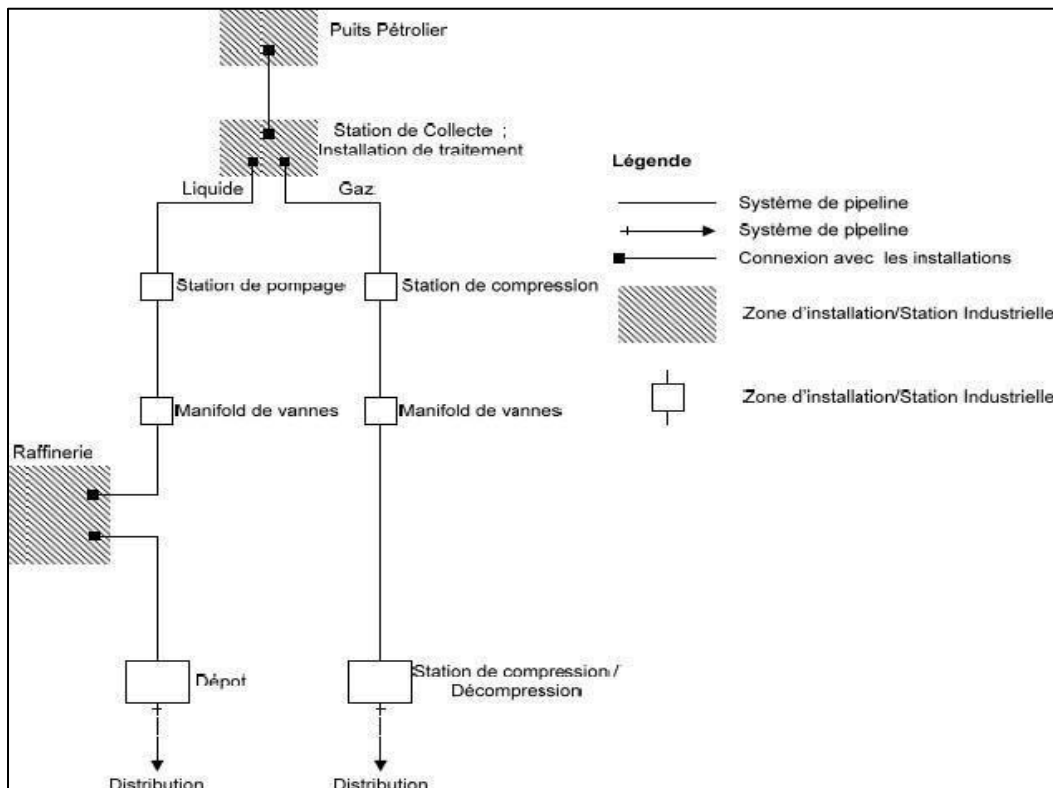


Figure 5 : Système de transport des hydrocarbures par canalisation

I.10 Réseau de transport des hydrocarbures par canalisation en Algérie

SONATRACH exploite un réseau de transport par canalisation des hydrocarbures (Pétrole Brut, Condensat, Gaz Naturel et Gaz Pétrole Liquéfié) composé de 22 Systèmes de Transport par Canalisation (STC) d'une longueur totale de 21 185 km.

Un STC est constitué d'une ou plusieurs canalisation(s) transportant des Hydrocarbures, y compris les installations intégrées, et les capacités de stockage liées à ces ouvrages, notamment les stations de compression, les stations de pompage, les postes de coupure, les postes de sectionnement, les lignes d'expédition, les postes de chargement à quai et en mer ainsi que les systèmes de protection cathodique, de comptage, de régulation, de télécommunications et de télécontrôle.

La gestion desdits STC s'opère à travers six (06) Directions Régionales (RTO, RTH, RTE, RTI, RTC, HRM) et deux (02) Directions Opérationnelles (GEM et GPDF). Les capacités de transport réelles, réservées et disponibles des différents Systèmes de Transport par Canalisation déclarées pour l'année 2022 se présentent comme suit :

- Capacité totale réelle : **405,874 MTEP** dont **264,182 MTEP** concernant le Réseau Nord et 141,692 MTEP pour le Réseau Sud ;
- Capacité totale réservée : **230,466 MTEP** soit 57 % de la capacité réelle ;
- Capacité totale disponible : **175,407 MTEP** [11]

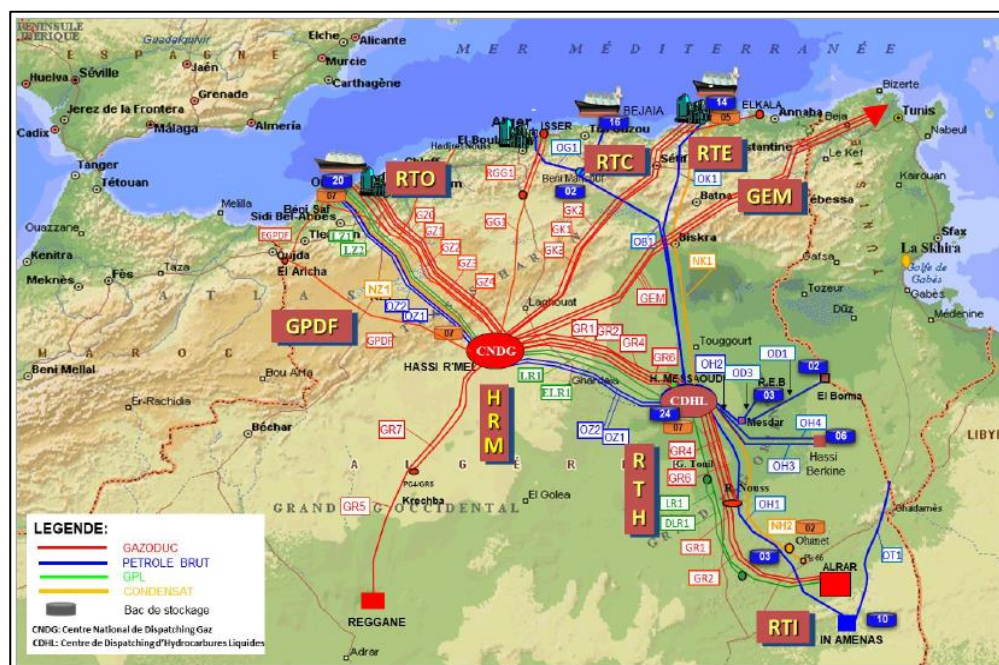


Figure 6 : Cartographie actuelle du Réseau de Transport

CHAPITRE I : Généralités sur les pipelines de transport de pétrole et de gaz naturel

Tableau 1:Exemple fonctionnel du réseau de transport par canalisation en Algérie

	Pétrole Brut	Condensat	GPL	Gaz Naturel	TOTAL
Nombre des STC	7	3	2	10	22
Nombre des Canalisations	12	3	5	23	43
Longueur (Km)	4 977	1 718	2 760	11 735	21 190
Nombre de Stations	35	5	11	34	85
Nombre de Bacs	100	28	-	-	128
Capacité Design Stockage (MTEP)	3,298	1,009	-	-	4,307
Capacité Réelle Transport (MTEP)	145,1	36,673	29,056	192,045	405,874

CHAPITRE II :

Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

II .1 Introduction

Contrairement aux autres modes de transports de matières dangereuses (routes, voies ferrées, voies d'eau...), le risque lié au transport par canalisation ne peut être considéré comme diffus.

Ce type de transport se compose d'un ensemble de conduites sous pression, de diamètres variables, qui sert à déplacer de façon continue ou séquentielle des fluides ou des gaz liquéfiés.

Les canalisations sont principalement utilisées pour véhiculer du gaz naturel (gazoducs), des hydrocarbures liquides ou liquéfiés (oléoducs, pipelines), certains produits chimiques (éthylène, propylène, etc.).

Véritables autoroutes pour les matières dangereuses, les canalisations peuvent être à l'origine d'accidents majeurs. L'analyse des accidents déjà survenus montre que la cause principale est une détérioration de la canalisation par un engin de travaux publics (pelle mécanique) ou un engin agricole. En cas de défaut de protection, l'oxydation de la canalisation peut également provoquer un accident.

II .2 Définition de 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 17ème siècle, [Flanagan et Norman 1993] [12].

-Selon [Larousse, 2006] [13] : Le risque est une éventualité d'un préjudice, d'un événement malheureux.

-Selon [Larousse, 2005] [14] : Le risque est une possibilité, probabilité d'un fait, d'un événement considéré comme mal ou un dommage. Où :

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

-Selon [HMSO, 1995] [15] : 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] [16] : 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] [17] : 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,

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

pour un aléa particulier. Le risque est le produit de l'aléa par la vulnérabilité.

-Selon [L'OHSAS 18001, 2005] [18] : 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] [19] : Le risque est une combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et de sa gravité.

-Selon [ISO 14971, 2007] [20] : Le risque est une combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité.

-Selon [ISO/CEI Guide 73, 2002] [21] : Le risque est une combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences.

-Selon [NF EN 50129, Mai 2003] [22] : 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] [23] : 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] [24] : Le risque est une probabilité qu'un effet spécifique se produise dans une période donnée ou dans des circonstances déterminées.

II .3 Gazoduc :

Est constitué d'un groupe de tubes réunis par un soudage, entrecoupé d'un groupe de poste, et ces derniers sont placés sur des dimensions spécifiques, chacun en fonction de son service et de son objectif. Car il garantit (permet) le flux de gaz et surveille son mouvement de la zone d'extraction à la zone de consommation et d'exploitation.

Un gazoduc est une canalisation destinée au transport des matières gazeuses sous pression, la plupart du temps des hydrocarbures, sur de longues distances. Il est un système étendu en longueur qui se compose d'un certain nombre de poste de compression dans le but de fournir l'énergie de pression nécessaire à l'écoulement du gaz [25].

La majorité des gazoducs acheminent du gaz naturel entre les zones d'extractions et les zones de consommation ou d'exportation. On estime la longueur totale des gazoducs dans le monde à un million de kilomètres, soit plus de 25 fois la circonférence terrestre. Les gazoducs sont en majorité terrestre, soit enfouis à environ un mètre de profondeur dans les zones habitées, soit posés à même le sol en zone désertique, ou en zone à sol dur. Leur diamètre varie entre 50

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

mm (2 pouces) et 1400 mm (56 pouces) pour les plus importants. Toutefois, le tarissement des sources de proximité et l'éloignement croissant des zones d'exploitation ont conduit à l'établissement de gazoducs sous-marins. Selon leur nature d'usage, les gazoducs peuvent être classés en trois familles principales [25] :

- **Gazoducs de collecte** : Ramenant le gaz sorti des gisements ou des stockages souterrains vers les sites de traitement ;

- **Gazoducs de transport ou de transit** : Acheminant sous haute pression le gaz traité (Déshydraté, désulfuré ...) aux portes des zones urbaines ou des sites industrielles de consommation ;

- **Gazoducs de distribution** : Répartissant le gaz à basse pression au plus près des consommateurs domestiques ou des petites industries.

Chaque gazoduc a sa particularité, c'est pour cela qu'il faut affecter à chaque conduite ses Propres caractéristiques telles que [25] :

- Les tronçons ;
- La longueur en km ;
- Le diamètre ;
- Le produit qu'il transporte ;
- Le nombre de stations de compression ;
- La provenance et la destination.

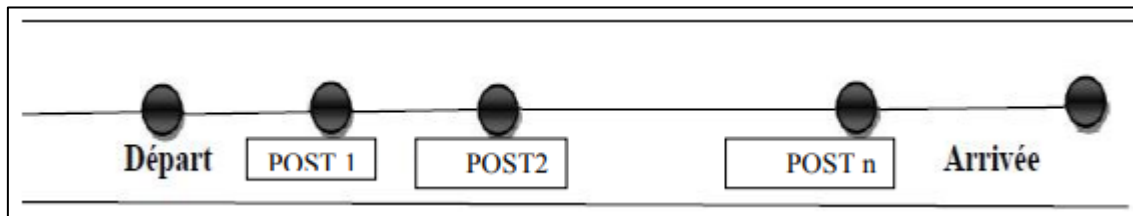


Figure 7 : Schéma de système gazoduc

II .3.1 Causes de défaillance de pipeline gazoduc :

Le retour d'expérience des accidents survenus sur des ouvrages de même nature indique que les sources de défaillances de canalisations sont dues à différentes causes :

- **Causes liées au facteur temps** : corrosion externe, corrosion interne, (en cas de présence d'agents corrosifs dans le produit, comme le H₂S) et érosion peuvent générer des défaillances sur le pipeline.

- **Causes indépendantes du temps** : systèmes d'exploitation, problèmes liés au climat, force tierce, glissement de terrain, type de sol (agressivité), etc. [26]

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

• **Causes stables** : défauts d'usine sur le tube et les équipements, défauts de construction (soudage, revêtement, etc.) La base de données Européenne (EGIG) a fait une collecte d'information sur plus de 130 000Km par an pendant la période entre 1970 et 2007. [26]

Les causes principales de défaillance de gazoducs sont résumées dans le tableau

Tableau 2: Résumé des causes principales de défaillance de gazoducs

Cause principale (1)	% du Total	Causes secondaires (2)	% cause (1)	Causes Tertiaire	% de (2)
Effets externes	49.6	Forage	38		
		Travaux	18		
		Agriculture	9		
		Drainage	8		
		autres	27		
Défaut de construction	16.5				
Corrosion	15.4	Externe	81	Par piqure	68
				Galvanique	12
				stress et fissure	5
				Inconnues	15
		Interne	15		
		Non connue	4		
Mouvement du terrain	7.3	Avalanche	55		
		Inondations	19		
		Inconnues	12		
		Mine/rivières, etc.	14		
Piquage en charge	4.6				
Autres	6.7	Eclair	25		
		Pas de détails	75		

II .3.2 Composants d'un système de transport par pipeline

Le pipeline est un système qui assure le transport des hydrocarbures, il est constitué de :

1. Les canalisations : Les caractéristiques importantes de la canalisation, celles qui déterminent avant tout l'importance de l'investissement, sont le diamètre et l'épaisseur des tubes. Le choix du diamètre fixant, pour une capacité donnée, la perte d'énergie par friction au cours de transport, donc, au moins pour les fluides incompressibles, la quantité totale d'énergie à injecter pour assurer ce transport. Le choix de l'épaisseur, déterminant la pression maximale d'utilisation, permet, au contraire, de définir le fractionnement de cette puissance, en d'autres termes, l'espacement des stations de pompage et compression le long de la ligne.

2. Les vannes : Le système est relié par des tubes et une série de robinets de purge à des vannes de sectionnement à fermeture rapide. Les vannes de sectionnement situées le long de l'emprise sur laquelle repose le pipeline sont un matériel de sécurité ordinaire pour tous les pipelines de transport de gaz naturel. Les vannes de sectionnement principales sont reliées au centre de commande pour assurer la surveillance de la pression et de la température du gaz et

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

afin d'effectuer une fermeture rapide des vannes de sectionnement en cas d'urgence.



Figure 8: vanne

3. Gares de racleurs : Les pipelines sont des outils essentiels de transport massif de fluides (liquides, liquéfiés ou gazeux) sur de grandes distances comme sur de petites liaisons. Ils allient débit important et discrétion et confirment année après année qu'ils sont le mode le plus sûr et le plus écologique de transport des hydrocarbures, notamment. Toutefois, si leur enfouissement permet cette discrétion dans la performance, il est aussi problématique dès lors qu'il faut envisager d'assurer la maintenance de ces ouvrages de transport. Ceci est en particulier le cas pour vérifier l'efficacité des mesures préventives mises en œuvre pour faire face aux diverses menaces auxquelles est soumise une canalisation enterrée ou sous-marine : milieu d'agressif, endommagement par des tiers ou par des éléments de terrain, fluide transporté corrosif. Il a donc été développé des outils qui permettent d'inspecter les pipelines de l'intérieur. Ces outils sont appelés racleurs ou pistons. Lorsqu'ils comportent des éléments de mesure et d'enregistrement, ils sont qualifiés d'instrumentés ou d'intelligents. Le passage de racleurs destinés à nettoyer la paroi interne des tubes est une pratique caractéristique des pipelines. Il est donc nécessaire de prévoir des 'gares' permettant l'envoi et la réception de ces racleurs, en général à partir des stations de pompage ou de compression.



Figure 9:Gares de racleurs

4. Station de compression (pour le gaz) : Les stations de compression participent au transport de gaz naturel sous forme gazeuse dans les canalisations souterraines appelées « gazoducs ». En effet, les gisements de production de gaz naturel sont, pour l'essentiel, situés très loin des centres de distribution et de consommation. Les pertes de pression que subit le gaz lors de son acheminement, imposent de ré-augmenter à intervalles réguliers la pression du gaz (tous les 120 à 150 km). C'est la raison d'être des stations de compression. Ces ouvrages permettent ainsi d'utiliser le réseau de transport de gaz naturel dans les meilleures conditions techniques et économiques.



Figure10:stations de compression de gaz

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

5. Poste de détente : c'est un poste de régulation permettant de diminuer la pression de fluide à l'aval. Ces postes sont souvent associés à des postes de livraison. Ils peuvent aussi séparer des portions de réseau exploités à des pressions différentes.



Figure 11: postes de détente haute pression

6. Les bacs de stockage : il existe deux types bac à toit flottant et les bacs à toit fixe, Ces bacs sont destinés pour stocker le brut et condensat. [27]

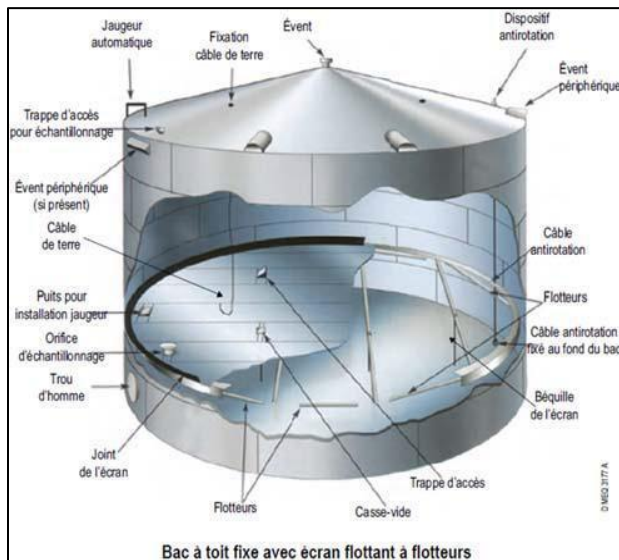


Figure 13:bacs à toit flottant

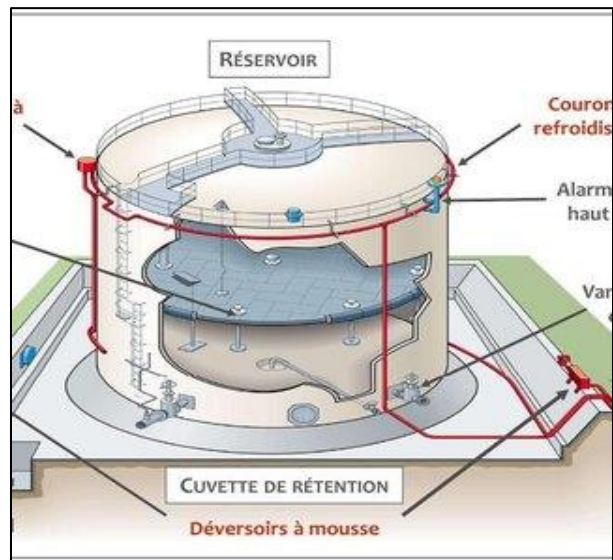


Figure 12:bacs à toit fixe

II .3.3 le transport gazoduc du gaz naturel

Le transport du gaz consiste à l'acheminer depuis la zone d'extraction jusqu'à la zone de consommation afin d'alimenter les réseaux de distribution.

A l'échelle nationale ou internationale, le transport du gaz relie les gisements aux réseaux de distribution de manière efficace, généralement invisible et en toute sécurité, les moyens de transport du gaz doivent parfois couvrir de longues distances et traverser plusieurs frontières afin de relier les pays producteurs aux pays consommateurs. [28]

• Description du gaz naturel

Le gaz naturel est incolore, inodore, insipide, sans forme particulière et plus léger que l'air. Il se présente sous sa forme gazeuse au-dessus de -161°C . Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures légers comprenant du méthane, de l'éthane, du propane, des butanes et des pentanes. Cependant, son composant principal est le méthane (au moins 84,87%).

Issu de la dégradation d'anciens organismes vivants, il est souvent présent dans les mêmes zones de production que le pétrole à des profondeurs allant de 1000 à 6000 mètres sous terre, il est extrait par forage [28].

• Les Caractéristiques principales du gaz naturel :

- Densité : 0.656 par rapport à l'air.
- Masse volumique : 0.78 kg/ m³.
- La capacité énergétique du gaz naturel est appelée Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) : 9482 Kcal= m³.

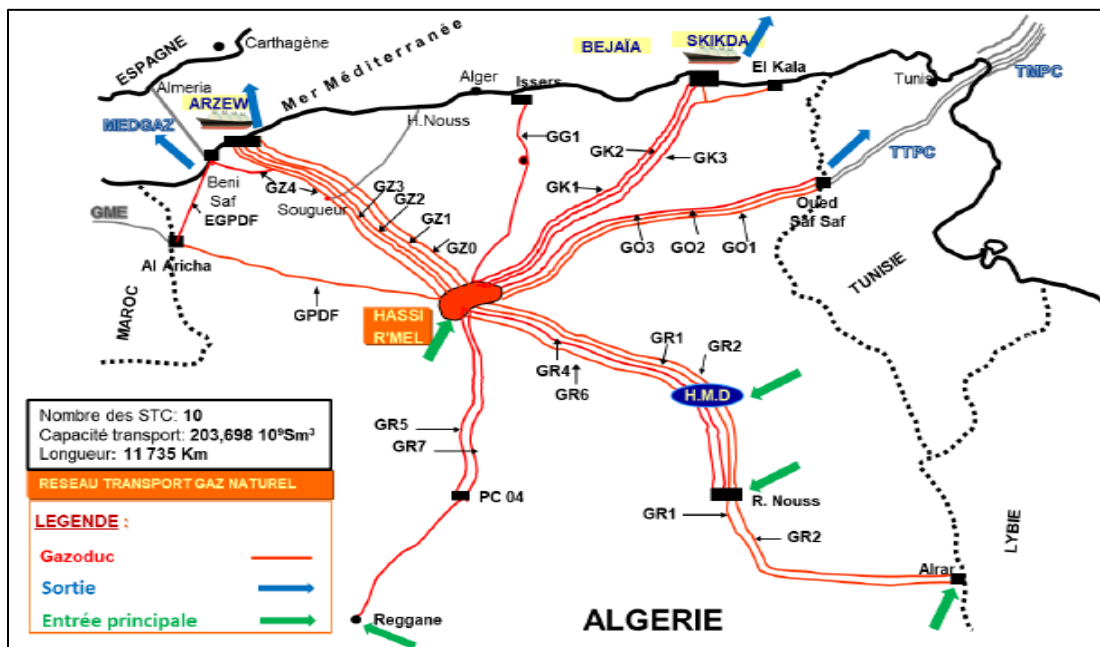


Figure 14: Carte du Réseau de Transport du GAZ naturel

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

Le transport de gaz naturel dans un gazoduc comporte un certain degré de risques pour le public en cas d'accident et des émissions de gaz qui s'ensuivrait. Un incendie ou une explosion provoquée par la rupture majeure d'un pipeline sont les deux plus grands dangers à craindre. [28]

II .3.4 le risque lié au transport par canalisation gazoducs :

Le risque lié au transport par canalisation ne peut être considéré comme diffus. Ce type de transport se compose d'un ensemble de conduites sous pression, de diamètres variables, qui sert à déplacer de façon continue ou séquentielle des fluides ou des gaz liquéfiés. Les canalisations sont principalement utilisées pour véhiculer du gaz naturel (gazoducs), des hydrocarbures liquides ou liquéfiés (oléoducs, pipelines), certains produits chimiques (éthylène, propylène, etc.) et de la saumure (saumoduc). Véritables autoroutes pour les matières dangereuses, les canalisations peuvent être à l'origine d'accidents majeurs. L'analyse des accidents déjà survenus montre que la cause principale est une détérioration de la canalisation par un engin de travaux publics (pelle mécanique) ou un engin agricole. En cas de défaut de protection, l'oxydation de la canalisation peut également provoquer un accident. La fuite ou la rupture d'une canalisation peut provoquer, à l'instar des autres modes de transport, trois types d'effets qui peuvent être associés : explosion, incendie et dégagement de nuage toxique (cf. infra Risque TMD). Un incident sur une canalisation peut avoir des conséquences sur la santé, les biens et l'environnement (déversement d'hydrocarbures dans le milieu naturel par exemple). [29]

II .3.5 Exemple d'accidents d'un gazoduc déroulé à travers le monde

1-Rupture et inflammation d'un gazoduc : BELGIQUE – GHISLENGHIEN

L'ouvrage à l'origine de l'accident est une canalisation de transport de gaz enterrée à 1m10. Elle relie le port de Zeebrugge (mer du Nord) à la France. A l'endroit du sinistre, 2 canalisations de gaz distantes l'une de l'autre de 7 m coexistent. L'une possède un diamètre de 90 cm construite en 1982 et l'autre, objet du sinistre, a un diamètre de 1 m et a été posée en 1991.

Les conséquences :

Les conséquences de l'accident sont multiples :

- **1-Conséquences humaines :** Avec 24 morts, dont 5 pompiers, 1 policier et 5 employés, 132 blessés

2-Des dégâts matériels : Une zone industrielle est totalement dévastée sur un rayon de 200 m. Une cartonnerie de 4 000 m², une station-service, de nombreuses toitures, des voitures sont détruites.



Figure 15 : Rupture et inflammation de BELGIQUE – GHISLENGHIEN

L'ORIGINE, LES CAUSES de l'accident

L'expertise du tronçon de canalisation projeté à 150 m révèle des traces d'éraflures. Ce constat oriente les enquêteurs vers la piste d'une agression mécanique qui aurait affaibli la paroi, 3 à 4 mm de matière restant au niveau de l'éraflure, créant ainsi une zone de moindre résistance à la pression. Sur la base d'un rapport d'expertise, le parquet de Tournai confirme en juillet 2006, l'hypothèse « d'une agression extérieure » du gazoduc lors de travaux de terrassement antérieurs.[30]

2-Ruptures multiples sur un gazoduc : CANADA – OTTERBURNE

Une explosion se produit vers 1h15 sur un gazoduc transportant du gaz naturel. Des flammes de 300 m de haut sont visibles. Les secours évacuent 5 maisons. La circulation routière sur la voie rapide proche est coupée. Par sécurité, Les pipelines adjacents sont fermés. L'incendie est éteint vers 15 h (le gaz a brûlé pendant près de 12 h).

Après examen des sections rompues, il apparaît que :

1. La conduite a cédé initialement (rupture n°1) au niveau d'une fissure préexistante qui était demeurée stable pendant plus de 50 ans et rien n'indiquait que le défaut avait progressé ;
2. Cette fissure date de la construction du pipeline, une mauvaise qualité de la soudure réalisée en atelier en serait à l'origine. L'inspection de chaque soudure par radiographie n'était pas exigée à l'époque, ni l'archivage des carnets d'inspection ;
3. La résistance de l'acier est faible et n'est pas conforme aux exigences actuelles (les spécifications des aciers ne figuraient toutefois pas dans les codes de construction en vigueur au moment de la mise en service de l'ouvrage).
4. Plusieurs facteurs sont également évoqués comme étant à l'origine de la rupture :

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

5. Mouvements du sol initiant des contraintes supplémentaires autour de la vanne (notamment suite aux multiples excavations et remblayages réalisés au fil des ans dans le cadre des activités de réparation et d'entretien normales des installations) ;
6. Les températures excessivement froides de l'hiver générant un gel profond des sols et modifiant également la répartition des contraintes mécaniques.

Des campagnes de raclage avaient été réalisées sur l'ouvrage en 2001 puis en 2009. Des excavations afin de vérifier l'intégrité de l'ouvrage avaient été également menées en 1997,1998,1999 et 2009, dans des zones proches du lieu de l'accident. Un tronçon de 38 m avait d'ailleurs été changé à la suite de la découverte de traces de corrosion sous contrainte.[31]

II .4 Oléoduc :

L'Oléoduc est l'élément principal de la chaîne de transport des hydrocarbures liquides. Il relie un parc de stockage principal (ex. le CNDL en Algérie) aux différents terminaux existant et les pipe-lines installés sur un territoire quelconque. Il a pour fonction aussi d'acheminer le pétrole brut aux raffineries et aux terminaux marins. L'exploitation de la ligne de transport se fait avec des débits variables selon la demande des terminaux et aussi selon le nombre des stations de pompage à mettre en service. [32]

Est un mode de transport, sur de grandes distances de matières fluides, réalisé au moyen de tubes et accessoires sous pression, constituant un système souvent en réseau. [33]

II .4 .1 le transport oléoduc du pétrole brut

Le pétrole est une matière première actuellement capitale dans les économies modernes, les oléoducs sont d'une importance primordiale dans la géopolitique du pétrole.

L'oléoduc est un mode de transport, sur de grandes distances de matières fluides, réalisé au moyen de tubes et accessoires sous pression, constituant un système souvent en réseau.

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

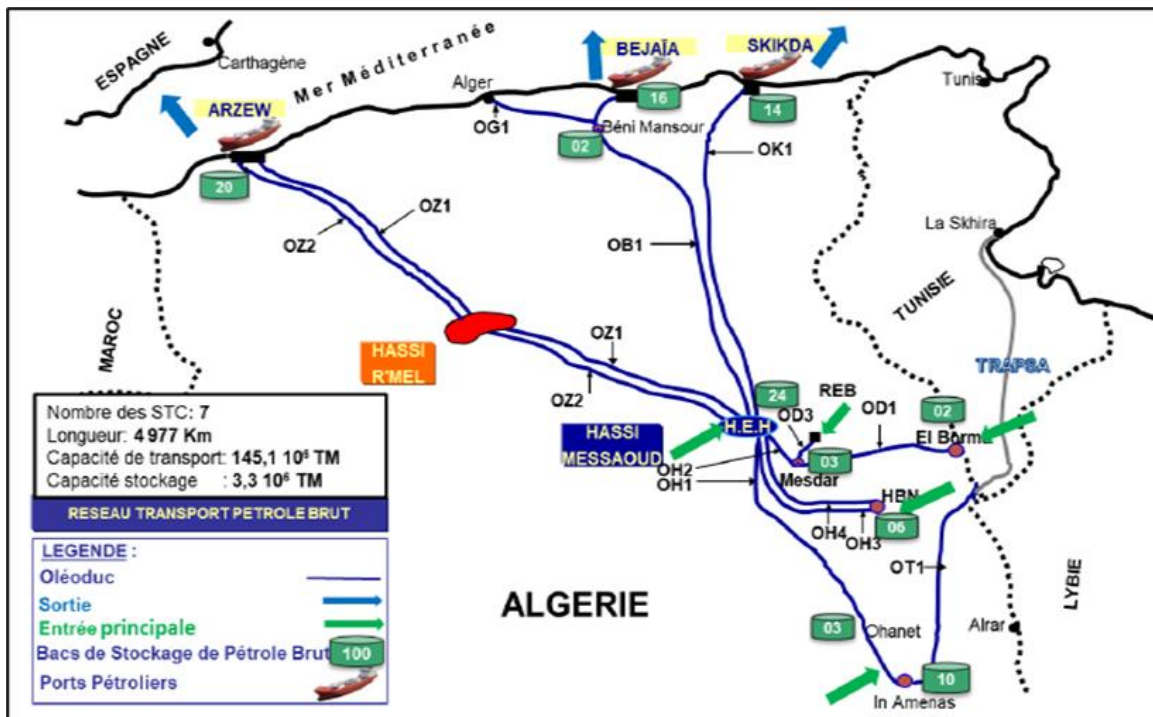


Figure 16 : Carte du Réseau de Transport du pétrole brut

Avantages :

- L'oléoduc fonctionne 24 h /24 h.
- La fiabilité est au maximum.
- La sécurité.
- Impact sur l'environnement.
- Les frais opératoires et d'entretien sont pratiquement négligeables.

Inconvénients :

- Exposition aux conditions climatiques.
- Dégradation.
- Exposition aux risques de conflits [33]

II .4 .2 Terminal de départ et d'arrivée Terminal de départ

Le **terminal de départ** : comprend les bâtiments techniques et administratifs, une base d'intervention et une base de vie, et permet de :

- Alimenter l'oléoduc.
- Limiter la pression maximale de service.
- Filtrer le gaz naturel.

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

- Lancer le piston racleur.
- Compter le débit du fluide.
- Prélever pour analyse des échantillons de pétrole.

Terminal arrivée :

Il comprend les installations terminales de canalisation, les bâtiments techniques et administratifs, une base d'intervention et une base de vie, soit en résumé :

- Une gare de réception de racleur.
- Une unité de filtration.
- Un bac de régulation.
- Un bac de comptage.
- Un laboratoire. [33]

II .4 .3 Les types de montage des oléoducs

Il en existe deux types :

1-Montage en parallèle

Une station est dite montée en parallèle si le fluide qui arrive est dérivé sur plusieurs pompes qui à leur tour, l'injection dans la canalisation. Le débit de sortie sera égal à la somme des débits évacués par chaque pompe mais avec une pression constante.

2-Montage en série

Une station est dite en série si le fluide qui arrive est injecté par la première pompe vers la deuxième, puis la troisième et ainsi de suite. A la sortie de la station, on aura ainsi une forte pression qui permettra au fluide d'avoir une force accrue de progression dans la canalisation.[33]

II .4 .4 Stations de pompage

Des stations de pompage permettent de pomper le pétrole sur de longues distances. En raison de la perte de la pression de la matière brute est réduite, la station de pompage a pour rôle d'augmenter de nouveau la pression. La pompe est actionnée par des moteurs électriques à entraînement direct.

Les stations de pompage permettent de redonner de la pression de pétrole afin que celui-ci soit transporté sur de grandes distances et dispose d'une pression suffisante pour être livré aux points de cession (réseaux de distribution et industriels). [33]

II .4 .5 Une station de pompage est constitué principalement de :

- Des réservoirs de stockage du pétrole brut.
- Des filtres.

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

- Un dispositif de comptage.
- Appareils de contrôle, système de commande et d'automatisation.
Atelier de réparation, salle de contrôle, base de vie.



Figure 17 : Une station de pompage

II .4 .6 Le Centre de Dispatching d'Hydrocarbures Liquides (CDHL) :

D'une Capacité de 1 400 000 barils/jour, est implanté à Haoud El Hamra (Hassi Messaoud), il permet notamment d'assurer :

- La réception du pétrole brut et Condensat ;
- Le stockage du pétrole brut et Condensat ;

L'expédition du pétrole brut et Condensat vers les terminaux marins et les raffineries, avec une flexibilité et une souplesse d'exploitation. [33]

II .4 .7 Les risques liés au transport de l'oléoducs

Les principaux risques sont ceux d'une rupture de la canalisation ou d'une fuite. Cependant les mesures qui entourent les canalisations rendent aujourd'hui cette probabilité extrêmement faible. Le principal danger provient des agressions humaines du fait des activités industrielles ou rurales ou de tiers en général à proximité de la canalisation. Les ruptures d'oléoduc ne sont pas rares. En Amérique du Nord, deux accidents récents, en juillet 2010 dans la rivière Kalamazoo, près de Marshall (Michigan) et l'autre, au nord de la rivière de la Paix (Alberta) en 2011, ont entraîné respectivement le déversement de plus de 3 000 et 4 000 mètres cubes (m³) de pétrole[34].

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

La fuite ou la rupture d'une canalisation peut entraîner différentes conséquences : une pollution de l'environnement, une explosion, un incendie déclenché par l'inflammation du produit. Afin d'éviter ces risques différentes mesures de prévention sont prises études multiples (géologiques, de dangers ...) réalisées par l'exploitant avant la construction du pipeline ; visites et surveillance régulières par l'exploitant (surveillances aérienne et pédestre) ; élaboration d'un Plan de Surveillance et d'Intervention (PSI) par chaque exploitant en liaison avec les services de l'état ; réglementation de l'aménagement dans les zones à proximité de la canalisation ; information de la population et signalisation visuelle le long du tracé du pipeline. [34]

II .4 .8 Défaillances dans les ouvrages de pipelines

Les principales causes des défaillances dans les canalisations sont de diverses natures. Elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite. La plupart de ces défaillances sont causées par des piqures de corrosion (pitting corrosion) ou par des fissurations comme la corrosion sous contrainte (cracking corrosion), mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrain (glissement du sol, tremblement de terre,) peuvent aussi être la cause de dommage sur les oléoducs enterrés.

Les exploitants de oléoducs étudient ces problèmes depuis longtemps et possèdent une bonne connaissance des méthodes permettant de les gérer

La figure suivante présente les causes des incidents significatifs des pipelines souterrain et sous-marin. [35]

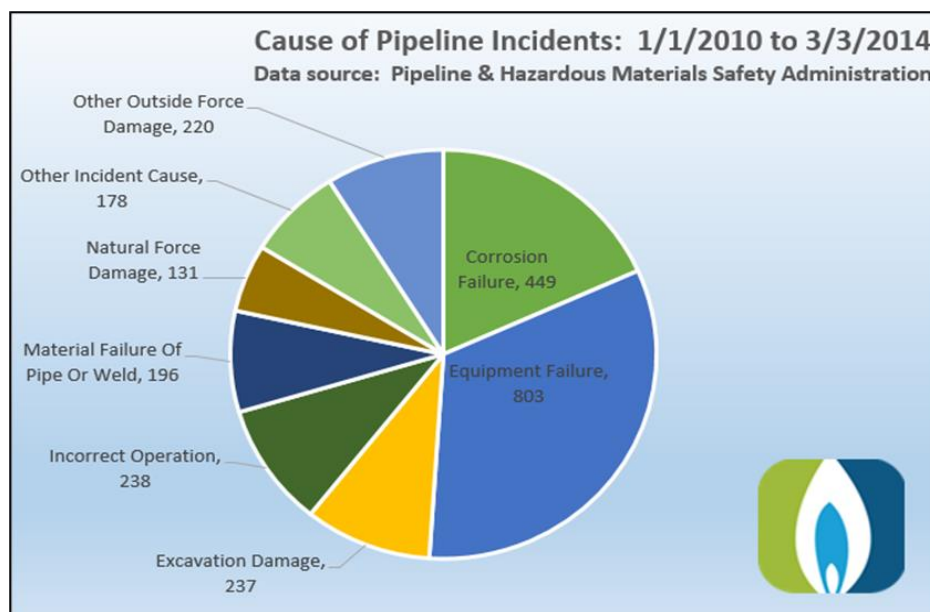


Figure 18: causes des incidents significatifs des pipelines

II .4 .9 Exemple d'accidents d'un oléoduc déroulé à travers le monde :

1-Dommages sur un site pétrochimique et rupture de pipelines à la suite d'une inondation :

A la suite d'une inondation par la rivière SAN JACINTO, 2 oléoducs construits sous le lit d'une rivière se rompent, provoquant une explosion et un incendie. Le lendemain, la rupture d'un troisième oléoduc initie une marée noire menaçant de polluer la baie de Galveston, riche en espèces d'oiseaux et de poissons. La quantité d'hydrocarbure déversée est estimée à au moins 68000 m³. Des centaines de personnes sont évacuées à cause de nuages de vapeur. L'endommagement d'un pipeline d'hydrocarbure perturbe par ailleurs l'alimentation en carburant de l'aéroport de Houston. Un site pétrochimique est mis à l'arrêt du fait des dommages après que des digues de protection aient cédé. Les coûts des dommages matériels sont estimés à 235 M€ (indices décembre 2019). Le bilan de l'inondation fait état de 18 morts et 120 blessés, avec plus de 10 000 personnes déplacées. Après une semaine de pluie, 33 comtés sont déclarés sinistrés. [36]

2-Explosions suivies d'un incendie dans un terminal pétrolier.

En milieu d'après-midi, une explosion suivie quelques heures plus tard d'une seconde déflagration se produit et provoque un violent incendie sur un terminal de transfert par pipeline dans une raffinerie. Des flammes de 5 m de haut ainsi qu'un fort dégagement de fumées noires sont observés. L'incendie, que les pompiers ont du mal à contenir, se propage à plusieurs pipelines (effets dominos). Par précaution, plusieurs plages voisines sont évacuées et la circulation est interdite dans un périmètre de 500 m autour du site. La raffinerie est située dans une zone fortement peuplée. Un club nautique est d'ailleurs touché par les flammes. Plus de 170 pompiers équipés d'une quarantaine de véhicules luttent pour refroidir le réseau d'oléoducs qui dessert le terminal et maîtrisent le sinistre au bout de 10 h d'efforts. Trente-deux d'entre eux sont soignés à la suite de légères brûlures et intoxication par les fumées. L'exploitant de la raffinerie indique que le terminal était en cours de modernisation (30 M. euro) notamment pour le remplacement des pipelines. L'accident initial se serait produit à l'occasion de ces travaux. [37]

II .5 Corrosion

La corrosion des pipelines de pétrole et de gaz est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécaniques sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres Fluides. Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans le processus électrochimique, la corrosion est un phénomène très complexe. La figure suivante présente des exemples de la corrosion interne et externe.



Figure 19: corrosion dans la pipe (a) : internes (b) : externe.

II .5 .1 Types de corrosion

1 Corrosion uniforme :

La corrosion uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée. Ce type de corrosion est habituellement prévu pour les pièces faisant partie d'élément structural qui peuvent être sacrifiés au fil du temps, mais elle affecte tous les métaux communs. Dans le cas des aciers au carbone, le fer réagit avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui est de l'oxyde de fer dont la formule chimique est Fe_3O_4 .

2 Corrosion par piqûres et corrosion caverneuse :

La corrosion par piqûres et la corrosion caverneuse sont des cas particuliers de la corrosion galvanique dans lesquels la perte de métal est localisée sur une zone de métal relativement petite. Dans de tels cas, la corrosion se produit à cause des différences de concentration localisées de l'oxygène ou d'un ion agressif, par exemple un ion de chlore, ou encore à cause d'une différence de pH. La corrosion par piqûres est associée au tartre et aux dépôts d'impuretés qui forment une barrière entre l'écoulement principal et l'eau stagnante.

La figure suivante présente la corrosion par piqûration. [38]

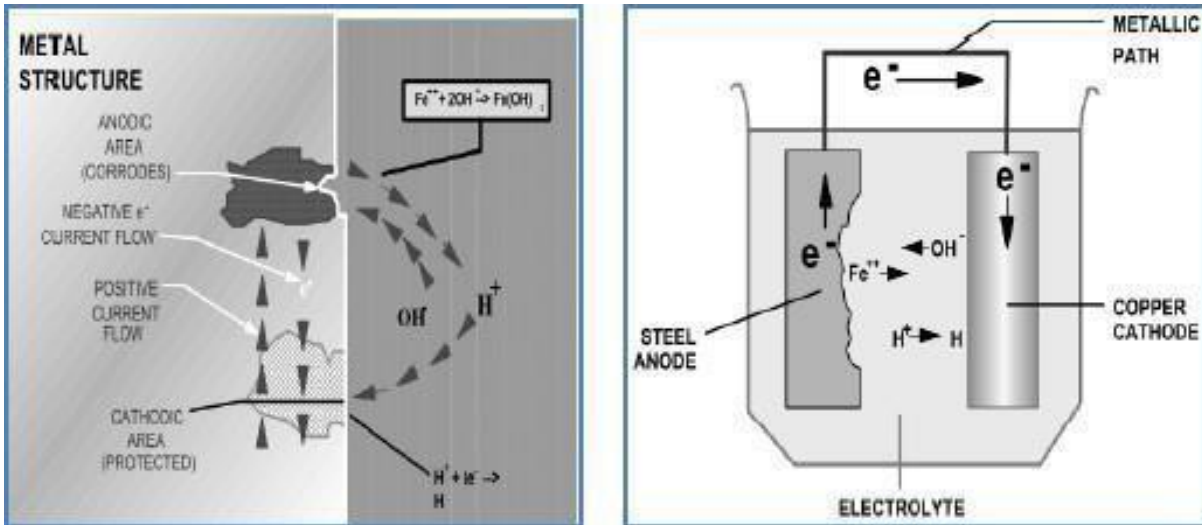


Figure 20: corrosion par piqûration

II .5.2 Fissuration des pipelines

La fissure est un défaut ou une discontinuité brutale apparue ou apparaissant dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, où la matière est séparée sur une certaine surface. Tant que les forces de contraintes ne sont pas libérées, elle entraîne une grande concentration de contrainte à son fond. Sa propagation, sous l'effet de contraintes suffisantes, combinée ou non avec un environnement agressif (corrosion sous contrainte) mène à la rupture. La figure suivante présente fissuration par corrosion sous contrainte.

II .5.3 Défaillances par rupture fragile

La rupture fragile ou la rupture par clivage s'accompagne de très peu de déformation plastique. La rupture se produit alors que les déformations sont purement élastiques. Dans les alliages métallique ce type de rupture est soit :

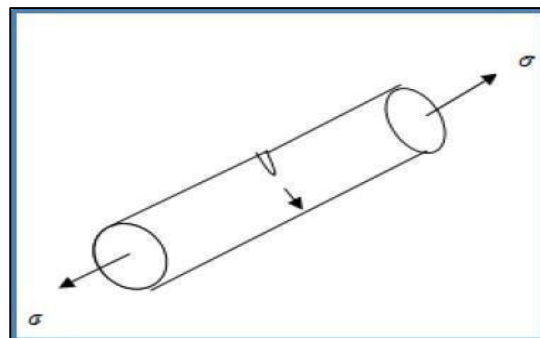


Figure 21 : Fissuration par corrosion sous contrainte

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

- Transgranulaire : rupture par clivage ou par glissement dans un grain.
- Intergranulaire : rupture par glissement le long des joints de grain.

Le clivage se produit préférentiellement le long de plan cristallographique bien définis selon les matériaux, les cubiques centrées (CC) alors que les cubiques à face centrée (CFC) clive difficilement. Dans les cristaux HC à basse température se produit également par clivage.

II .5.4 Défaillances par rupture ductile

La rupture ductile se caractérise par une forte énergie de rupture, une importante déformation à rupture, un faciès mat et fibreux et par la possibilité de déformation plastique importante. Elle se manifeste essentiellement par la présence des inclusions ou précipités. Elle résulte de la naissance des cavités, l'allongement de ces cavités dans le sens de déformation et coalescence de celles-ci par striction ou cisaillement qui conduisent à la rupture finale. Les défauts responsables de l'amorçage dans la rupture ductile sont essentiellement les éléments d'addition dans les alliages, les inclusions, les précipités (par traitement thermique) et les joints de grain (points triples). À l'échelle macroscopique, on voit des microreliefs appelées cupules.

Dans les matériaux des gazoducs alliés, il existe des particules composées de différents éléments d'alliages très fragiles et ne peuvent accommoder la déformation plastique de la matrice. Comme ces particules ne peuvent pas se déformer aussi facilement que la matrice, elles perdent leur cohérence avec la matrice quand une déformation plastique intense se produit dans leur voisinage et permettent la formation de minuscules trous qui croissent par glissement et qui provoquent la rupture.

La figure suivante présente les modes de rupture.

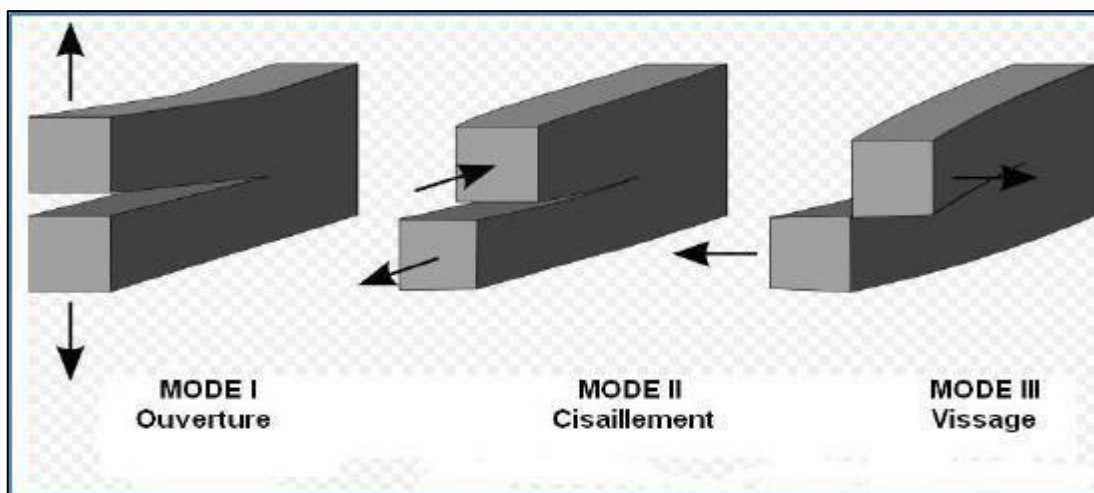


Figure 22: Modes de ruptures.

II .6 Les éraflures :

Une éraflure est un endommagement superficiel de la surface dû à un contact avec un objet étranger qui provoque un enlèvement de matière. Cette éraflure peut être considérée comme une entaille. Les dimensions d'une éraflure sont définies de façon que la longueur soit plus grande que la largeur.



Figure 23: Éraflure.

Le choc causé par l'agression externe peut néanmoins provoquer de graves endommagements au tuyau. En service, l'action de la pression pourra provoquer une rupture localisée qui provoquera elle-même une fuite et éventuellement une explosion. Un exemple récent de grave accident résultant de ce processus a eu lieu en Belgique en été 2004 (explosion d'un pipeline).



Figure 24: Lieu d'accident d'explosion de pipeline en Belgique (été 2004).

II .7 Les Enfoncements

Un enfoncement dans un pipeline est une déformation plastique permanente de la section circulaire de la paroi du tube dû à un impact avec un corps étranger (exemple : le godet d'un engin en travaux pour les canalisations enterrées ou posées par terre, les ancrs des bateaux pour les pipelines immergés). Autrement dit un enfoncement est un changement de la courbure de la paroi du pipeline sans changement d'épaisseur. (Voir la figure 25).

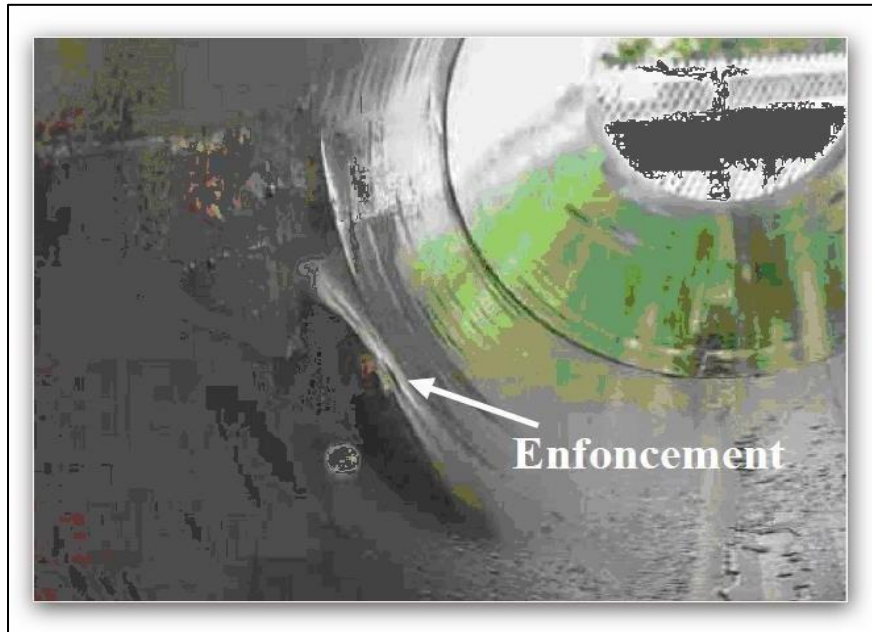


Figure 25: Photo d'un pipeline enfoncé.

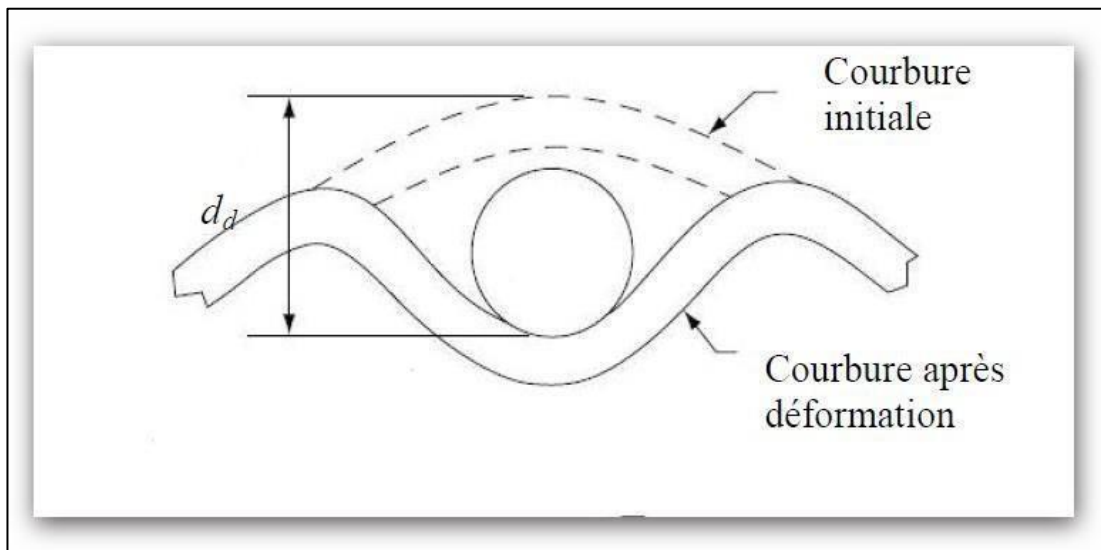


Figure 26 : Géométrie d'un enfoncement

Un enfoncement provoque une concentration locale de contrainte et de déformation et une réduction locale du diamètre du tuyau. La présence des enfoncements dans les tuyaux peut se résumer aux cas suivants :

- Indentation lisse (Plain dent) : ce type d'enfoncement correspond à celui où il n'y a pas de réduction de l'épaisseur de la paroi du tube.
- Indentation pliée (kinked dent) : c'est un enfoncement qui provoque un changement brusque de la paroi du pipeline.

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

- Indentation dans des soudures : cela traduit la combinaison d'un enfoncement et d'un autre défaut car les soudures sont susceptibles de présenter des fissures.

➤ **Les défauts combinés (enfoncements avec éraflures)**

Un enfoncement est une déformation plastique permanente de la section du pipeline dû à un contact avec un corps étranger (agression externe), ce même contact peut aussi provoquer un enlèvement de la matière. Dans ce cas, on se retrouve dans une situation où on a un défaut combiné (enfoncement avec éraflure).

La présence d'un défaut tel qu'un enfoncement avec éraflure dans une canalisation est très dangereuse. En effet, en plus de la concentration de contraintes provoquée par l'agression externe, il y a aussi une réduction de l'épaisseur du pipeline due à la présence de l'éraflure. En conséquence, on constate une diminution locale de la résistance mécanique de la canalisation. Le résultat fatal d'un défaut combiné c'est l'explosion de pipeline. [38]

II .8 Sécurité industrielle du transport par pipeline

Le transport par canalisation mobilise des fluides et des énergies qui représentent, comme toute activité industrielle, un danger. Le risque industriel lié à ce danger est estimé et traité, dans le cadre des réglementations locales et internationales en vigueur, pour être ramené à un niveau résiduel acceptable par la société, représentée par les organismes de contrôle et diverses associations.

En France, une mise en cohérence de nombreuses règles antérieures et une augmentation des exigences ont été concrétisées notamment par l'entrée en vigueur des divers règlements de sécurité de transport multi fluide par canalisation, entre 2006 et 2014.

Ainsi, au-delà des opérations classiques d'entretien faisant partie de l'exploitation de l'ouvrage, un diagnostic poussé des ouvrages de transport est réalisé périodiquement, en fonction des réglementations nationales et des pratiques locales. En particulier, l'intégrité physique des canalisations fait l'objet de contrôles non destructif (CND) notamment par des mesures électriques de surface (courant de Foucault), par auscultations électromagnétiques ou par ultrasons, réalisées à partir de pistons racleurs instrumentés.

Quel que soit le niveau de sécurité visé et les moyens mis en œuvre pour l'obtenir, l'accident reste toujours possible. Tous les scénarios d'accident se ramènent à une perte de confinement du produit transporté et à une interaction néfaste du produit libéré avec l'environnement inerte ou vivant. Des plans d'urgence sont établis, en relation avec les pouvoirs publics. [38]

II .9 Maintenance et réparation des pipelines

II .9 .1 Introduction

Les maintenances des pipelines offrent des possibilités d'augmenter la capacité de transport des hydrocarbures (gaz et pétrole) par l'élévation de la pression de service et la récupération des structures après la défaillance des conduites de transport qui ne sont pas encore utilisées de nos jours de manière assez rationnelle, alors que les tendances mondiales dans ce domaine prévoient augmentation de leur durée de vie. Le passage à des pressions de service élevées à long terme nécessite l'amélioration des propriétés mécaniques des aciers de ces derniers et de trouver des solutions techniques, de manière à réduire les épaisseurs des parois contre les défaillances des pipelines destinés au transport des hydrocarbures. En d'autres termes, la qualité des hydrocarbures de grand débit et les risques naturels ou des effets mécaniques dépend du choix de la meilleure combinaison entre les propriétés des pipes, à savoir la résistance et la ténacité.

Les valeurs des charges extérieures sollicitant la conduite et sa capacité portante ont un caractère aléatoire qu'on exprime par certaines fonctions de distributions. En effet, la conduite est conçue d'un nombre fini de tubes, dont les caractéristiques géométriques et la résistance diffèrent de manière aléatoire suite aux imperfections résultant des processus technologiques de fabrication des tôles et des pipes.

A l'heure actuelle, la qualité de réparation des pipelines destinés au transport par canalisation des hydrocarbures est une question primordiale. L'objectif dans ce cas est de réduire les ruptures (ou les éclatements) des pipes dont les conséquences sont souvent désastreuses.

II .9 .2 Maintenance

II .9 .2 .1 Objectif de la maintenance

L'objectif de la maintenance des pipelines est de s'assurer que les actifs physiques continuent à fonctionner de manière que l'utilité du produit final ne soit pas affectée et à préserver la fonction du système. Dans le cas des systèmes de pipelines, les actifs physiques sont les tuyaux, les vannes, les équipements actifs (pompes, compresseurs, etc.), les instruments, les équipements fixes (cuves, échangeurs de chaleur, etc.), les composants en ligne (siphons, filtres, etc.) et soutiens. Il existe également des systèmes de support permettant au système de pipelines de remplir sa fonction : instrumentation et contrôles, traçage thermique, alimentation électrique des opérateurs de vannes, etc.

La maintenance est le lieu où l'ingénieur peut s'approprier le matériel qui va le guider dans son travail. Le système fournit des informations importantes à l'ingénieur lorsqu'il fonctionne

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

parfaitement, est en dysfonctionnement ou en panne. Les entreprises traitent ces informations de différentes manières :

- Les informations de maintenance sont ignorées. Les problèmes sont corrigés au moment de la rupture.
- Les informations de maintenance sont enregistrées sous forme de données, numériques ou physiques
- Les données de maintenance sont converties en connaissances pour quelques mécaniciens de maintenance et éventuellement l'ingénieur système.
- Les connaissances en matière de maintenance sont converties en expérience, grâce à l'analyse, aux tendances et à la communication avec l'ensemble de l'organisation.
- Cette progression de rien aux données, à la connaissance, à l'expérience différencie les opérations excellentes des opérations médiocres. [38]

II. 9 .2 .2 Planning de maintenance

Les étapes d'un plan de maintenance sont les suivantes :

1. Pour chaque système, déterminer une stratégie de maintenance : proactive ou réactive.
2. Pour chaque système identifié comme maintenance proactive, préparer une liste de composants (segments de conduite, vannes, pompes, etc.). Pour chaque composant, spécifiez la fonction requise, son mode de défaillance et sa cause.
3. Pour chaque cause de défaillance d'un composant, sélectionner la technique d'inspection appropriée. L'objectif est de décider de ce qui doit être inspecté, quand, où et comment.
4. Déterminer les critères d'acceptation qui seront utilisés pour évaluer les résultats de l'inspection.
5. Planifier et mettre en œuvre les inspections de maintenance, soit en cours de fonctionnement (en ligne), soit en cas de panne (arrêt).
6. Documenter les résultats et maintenir une base de données

II .9 .2 .3 Stratégies de maintenance :

Il existe deux stratégies de maintenance : une approche réactive (maintenance corrective, fonctionnement des composants jusqu'à défaillance ou presque) ; ou une approche proactive (inspection de l'équipement et mesures préalables en vue d'une révision, réparation ou remplacement avant l'échec). Dans le cadre de la stratégie proactive, nous pouvons différencier la maintenance préventive lorsque les inspections sont basées sur le temps, planifiée à intervalles fixes (par exemple, le changement d'huile tous les mois) et la maintenance prédictive lorsque les

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

inspections sont basées sur des conditions justifiées par l'analyse et la tendance des résultats d'inspection. La maintenance prédictive a pour objectif d'atteindre un degré de fiabilité nécessaire et suffisant. Par nécessaire, nous voulons dire que cette approche ne devrait être mise en œuvre que lorsque cela est nécessaire. Il existe des systèmes pour lesquels une maintenance proactive n'est pas nécessaire. Ce sont des systèmes dont la défaillance aurait peu d'incidence sur la sécurité et l'opération, et ils peuvent être facilement réparés et remis en service. Une maintenance corrective serait appropriée dans ces cas. Par suffisant, nous entendons que, lorsque la maintenance prédictive est jugée nécessaire, elle doit être effectuée de manière à minimiser les coûts, tout en garantissant le niveau de fiabilité souhaité. L'objectif n'est pas d'avoir un équipement aussi bon que neuf, mais suffisamment performant pour s'acquitter de sa fonction de manière fiable et sûre. Les systèmes faisant partie d'une stratégie de maintenance proactive incluent :

- Base de la sécurité des installations : systèmes essentiels pour prévenir ou atténuer les accidents crédibles qui auraient des conséquences inacceptables pour les travailleurs, le public ou l'environnement.

- Perte de production : systèmes indispensables pour maintenir un niveau de débit de production acceptable.

- Coût de maintenance : systèmes avec équipement qu'il serait coûteux de remplacer ou qui nécessiteraient de longs délais.

- Risque de défaillance : systèmes présentant un risque plus élevé de défaillance, par exemple en raison de la corrosion, d'un fonctionnement à haute pression ou à haute température, d'un fonctionnement supérieur aux recommandations du fournisseur ou fondé sur les expériences passées de l'entreprise ou du secteur.

- Exigences réglementaires : systèmes ou composants devant être contrôlés ou testés périodiquement par réglementation.

II .9 .2 .4 Activités de maintenance :

Les activités de maintenance visent à garantir que les pipelines et les équipements utilisés fonctionnent de manière sécurisée. Les exigences réglementaires détaillant les normes minimales d'inspection, de maintenance et de protection ont considérablement augmenté ces dernières années et l'industrie améliore continuellement ses connaissances concernant les techniques de prévention et de protection des pipelines. Ces activités, régulièrement effectuées, sont les suivantes :

II .9 .2 .4.1 Emploi de racleurs

Un pipeline doit être doté d'équipements spécifiques à l'inspection par des racleurs instrumentés. Il s'agit notamment de "gares de racleur" permettant le lancement et la réception de ces racleurs qui peuvent parfois être fournies par des prestataires extérieurs. Il faut aussi s'assurer que les rayons de courbure du pipeline permettent le passage de tels racleurs. Si cette condition n'est pas remplie, par exemple sur des lignes construites antérieurement à l'existence des racleurs instrumentés, des travaux, souvent importants, sont impératifs.

Ces racleurs instrumentés regroupent un ensemble d'outils d'inspection apte à détecter les défauts susceptibles d'être présents sur l'intégralité de la surface tant interne qu'externe du pipeline.

Après une inspection par racleur, l'exploitant du réseau dispose d'un ensemble de données révélant des défauts qualifiés (nature et localisation) et quantifiés (valeurs ou position sur une grille d'acceptabilité). Cet ensemble met en valeur l'efficacité des moyens de prévention mis en place. Des adaptations/améliorations sont décidées si nécessaire.

Si certains défauts sont inacceptables au regard de la réglementation ou des conditions d'exploitation, ils sont réparés sans délai ou parfois les conditions d'exploitation seront temporairement adaptées.

Enfin, certains défauts, ne mettant pas en cause l'intégrité de la ligne, sont laissés "en l'état" et historisés. La modélisation de leur progression permet d'évaluer leur durée de vie potentielle,

C'est à dire jusqu'à l'arbitrage entre la réparation différée ou la nécessité de refaire une inspection avant le délai réglementaire. A l'inverse il peut être intéressant de réparer par anticipation des défauts acceptables notamment si cela permet de repousser une coûteuse inspection par racleur. [38]

II .9 .2 .4.2 Essais hydrostatiques

Le test de pression hydrostatique est une méthode de test des pipelines utilisés depuis des décennies. Ces tests sont utilisés afin de vérifier que les canalisations des pipelines sont conformes au service demandé. Ils sont également utilisés dans diverses applications annexes :

- Tests de résistance avant la mise en service d'un pipeline nouvellement construit ;
- Tests d'un tronçon de remplacement avant son raccordement au pipeline principal ;
- Méthode de requalification périodique d'un pipeline durant son exploitation ;
- fixation d'une nouvelle pression maximale de service (PMS).

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

Les essais hydrostatiques consistent à retirer le produit transporté du tronçon de pipeline à tester et à le remplir d'eau. L'eau est ensuite pressurisée à des niveaux supérieurs à la pression maximale de service (PMS) afin de vérifier la bonne résistance du tube. L'évolution de cette surpression est surveillée en continu durant toute la durée de l'essai (8 heures minimum pour les canalisations enterrées). S'il y a une baisse inexplicée de cette pression il y a forte présomption de fuite et les essais sont stoppés. Plusieurs méthodes sont utilisées pour sectionner la ligne et identifier l'emplacement de la fuite. Dans certains cas, l'eau d'essai est colorée avec un produit identifiable, biodégradable et sans danger pour l'environnement. Une fois les réparations terminées, la ligne est à nouveau testée dans les mêmes conditions hydrostatiques jusqu'à ce que le test soit réussi. L'essai hydrostatique réussi, l'eau du test est évacuée et la conduite remplie du produit initial. La conduite peut reprendre son fonctionnement à la PMS normale ou révisée. [38]

II .9 .2 .4.3 Protection cathodique :

Les pipelines sont protégés par un système de protection cathodique (PC) en prévention de la corrosion. Ce système nécessite l'équipement de stations d'alimentation électrique et de test connecté au pipeline pour maintenir et mesurer le potentiel électrique correct de la conduite par rapport au sol, l'assurant ainsi cathodiquement contre la corrosion. Périodiquement des campagnes de mesure et rapports sont établis.

II .9 .2 .4.4 Dégagement de la zone de droit de passage :

Le dégagement de tout arbre et le défrichage de toute végétation racinaire dans la zone de droit de passage facilite une intervention rapide et sûre sur le pipeline. En effet toute plante racinaire est attirée par la chaleur et l'humidité présentes à proximité d'une conduite enterrée et cela favorise la croissance des racines qui peuvent s'enrouler autour, endommager son revêtement de protection et réactiver ainsi la corrosion de la pipe.

Une emprise dégagée du pipeline fournit un efficace repère visuel informant le public de sa présence et lui rappelant l'interdiction de tout excavation ou aménagement de cette zone. De même elle facilite l'inspection aérienne qui est effectuée périodiquement afin de détecter toute anomalie.

II .9 .2 .4.5 Inspection et maintenance des canalisations en service :

L'inspection et la maintenance des canalisations en services est un domaine multidisciplinaire il demande la présence d'équipe et des équipements de contrôle tout le temps, il associe trois secteurs technologiques : Inspection, Matériaux et Mécanique. Ces trois secteurs

CHAPITRE II : Les risques gazoduc et oléoduc et leur maintenance

sont présentés dans la figure avec leurs diverses fonctions.

Aspect Matériaux : Essais mécaniques Données mécanique et physiques des matériaux....

Aspect Mécanique : Analyse des contrainte des éléments finis, mécanique de rupture, Analyse limite,

Aspect Inspection : les différentes méthodes de contrôles non destructifs Inspection et maintenance des pipeline en service

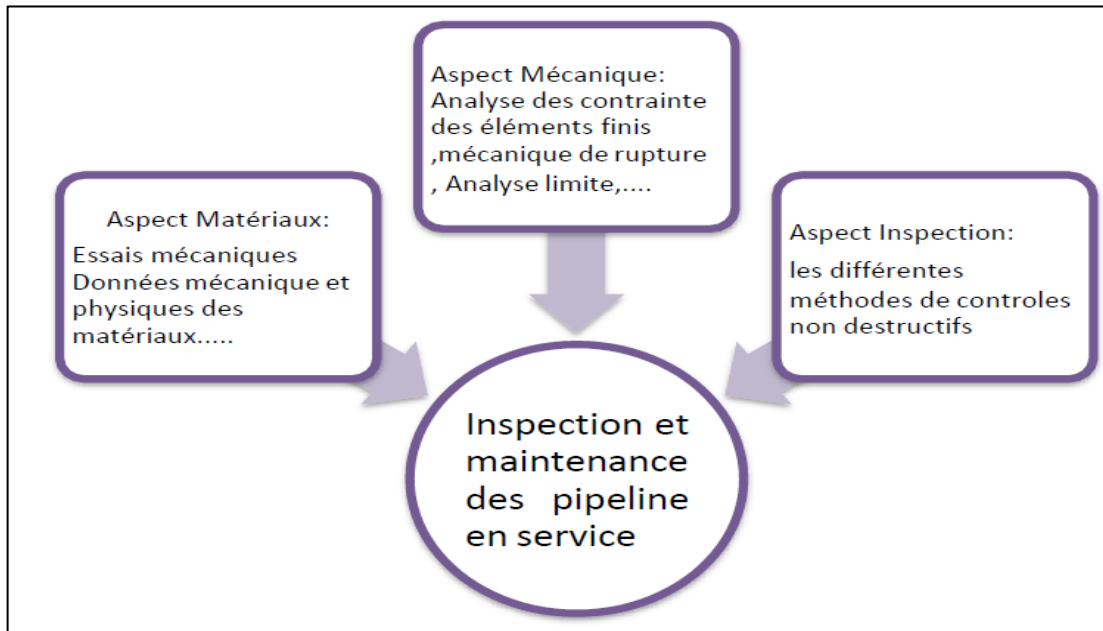


Figure 27 : Les trois secteurs technologiques impliqués dans l'inspection et la maintenance du pipeline en service.

Les inspecteurs sont les yeux et les oreilles de chaque unité opérationnelle ; ils examinent, regardent et recueillent des données critiques à l'issu de l'inspection. Ils examinent les problèmes et spécifient le type et la procédure de réparation.

Les décisions de réhabilitation de canalisations reposent essentiellement sur les résultats des inspections suivantes :

- Mesures du potentiel de la protection cathodique
- Mesures de résistance du revêtement
- Inspections par outil instrumenté.

Principales causes des dégradations de canalisations :

- Mauvaise application des revêtements durant la construction ;
- Dégradation rapide des revêtements appliqués ;
- Agressivité des sols traversés ;
- Défaillance des systèmes de protection cathodique ;
- Interférences entre les systèmes de PC de différentes pipes.

II .9 .2 .4.5.1 Méthodes de contrôle non destructif (CND) :

Le contrôle non destructif ou encore le CND est l'ensemble des théories et procédés aptes à fournir les informations sur l'état de bon fonctionnement d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure, on distingue les types suivants :

a) Examen visuel :

Une équipe de contrôleurs expérimentés inspecte toutes les surfaces extérieures et intérieures du tube. Ils signalent tous les anomalies d'aspect ou forme qui pourront être corrigées. Lors des mesures de pertes d'épaisseurs, il est indispensable de réaliser une inspection visuelle préliminaire afin de fournir un rapport :

- L'état général des surfaces (produits de corrosion, pollution).
- Les désordres (nature, localisation et ampleur).
- Le relevé précis des réparations réalisées antérieurement.
- Les déformations constatées.

Les inspections visuelles ont aussi leur importance. Sur le terrain, le personnel des pipelines parcourt l'emprise à la recherche de tout indice tel que les flaques de pétrole ou la modification de l'environnement. [38]



Figure 28 : Examen visuel.

b) Détection par ultrasons :

Deux bancs de contrôle ultrasonores sont utilisés pour inspecter à nouveau toute la zone soudée. Les appareils installés permettent une recherche très fine des anomalies. Chaque "tête" de recherche est équipée de 6 palpeurs qui sont réglés en particulier pour déceler les plus fines fissures transversales ou longitudinales.

Les deux bancs de contrôle permettent de réaliser cette opération à vitesse réduite tout en assurant un écoulement normal de la production. Bien entendu la fiabilité des appareils est surveillée à l'aide de plaques étalon immédiatement accessibles.

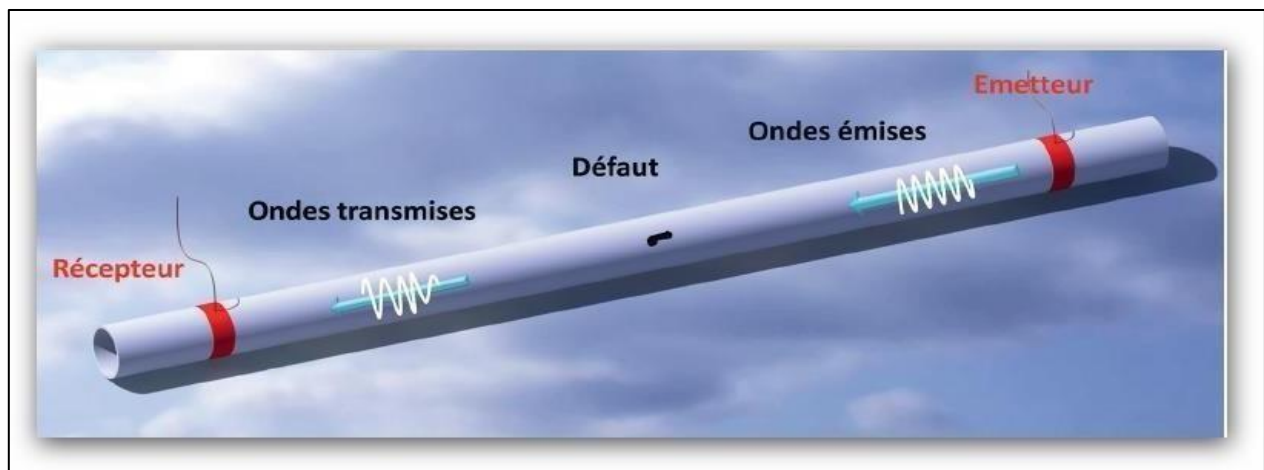


Figure 29 : Le principe de détection par ultrasons.

c) Détection par flux magnétique :

Cette technique utilise de puissants aimants induisant un flux magnétique dans la paroi de la conduite. Des capteurs placés entre les pôles détectent tout changement d'intensité résultant d'une perte de métal ou d'un changement d'épaisseur. La puissance du flux magnétique requise est relativement élevée. Les premiers outils MFL (magnétique flux leakage) ont particulièrement souffert de cet inconvénient surtout pour les grands diamètres. La firme TUBOSCOPE, qui commercialisé le premier outil intelligent, a choisi d'utiliser des électroaimants permanents. BRITISH GAZ a ainsi réussi à multiplier par dix la puissance des aimants permanents en développant de nouveaux matériaux magnétiques tels que le N.I.B (Neodinium-Iron-Bore). Un autre axe ayant favorisé le développement des technologies MFL concerne les progrès réalisés dans la technologie des capteurs. Les premiers capteurs étaient très larges et donnaient lieu à des pertes de contact avec la paroi à chaque changement de direction de la conduite (au niveau des zones de courbure particulièrement). Les capteurs actuels se sont considérablement améliorés au point où la détection des pertes de métal et même possible au niveau des cordons de soudure et sur la face interne et externe de la paroi. Ils peuvent même être adaptés pour mesurer l'épaisseur absolue de la conduite. [38]

d) Détection par radiographie :

C'est disposé de trois chambres de radiographie installées en parallèle.

Les tubes sont amenés par trains de rouleaux. Chaque chambre est équipée d'appareils

Émetteurs Rx (rayons x) de 300 kV, 3 mA à tir vertical de haut en bas. La génératrice soudée des tubes est placée au point le plus haut. La radiographie obligatoire des zones soudées et réparées et celle des zones signalées au contrôle ultrasons est effectuée sur des films spéciaux placés dans des cassettes plastiques qui sont fixées à l'intérieur du tube par des systèmes magnétiques ou mécaniques.

Les films sont ensuite traités dans une machine automatique de développement qui livre le film sec en 10 minutes. L'interprétation des images est faite par des contrôleurs très expérimentés qui transmettent les décisions au poste de répartition par un système de fiches, simple et efficace. Les extrémités des tubes sont contrôlées aux Rx sur deux installations séparées, à la sortie du banc d'épreuve.

II .9 .2 .3 Méthodes de réparation des pipes :

II .9 .2 .3.1 Réparation par demi-coquilles soudées :

La procédure de réparation en charge des canalisations de transport d'hydrocarbures par l'installation de demi-coquilles soudées à encerclement total. Les demi-coquilles soudées à encerclement total, également connues sous le nom de demi-coquilles de type B, renforcent la zone défectueuse et contiennent toute éventuelle fuite, et sont par conséquent utilisées pour réparer des défauts débouchant ou non-débouchant d'orientation axiale ou circonférentielle.

La figure suivante présente la géométrie de demi-coquilles.

Les demi-coquilles soudées permettent de réparer les défauts suivants :

- Corrosions internes et externes ;
- Enfoncements simples ou combinés à d'autres défauts ;
- Entaille et rayures ;
- Fissures au niveau du corps du tube ou du cordon de soudure circonférentiel.

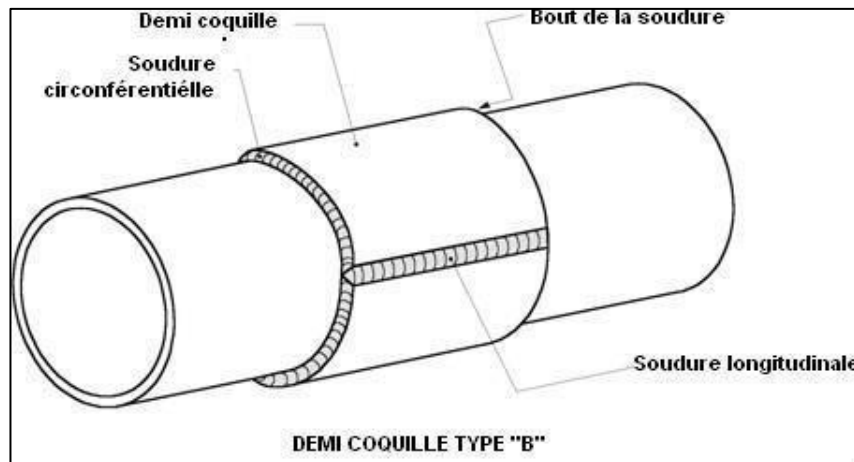


Figure 30 : Géométrie de demi-coquilles.

La figure suivante présente l'opération de soudages de demi coquilles (STT). [38]



Figure 31 : Opération de soudages de demi coquilles (STT).

II .9 .2 .3.2 Réparation par Clockspring :

Les compagnies d'exploitation de pipelines peuvent périodiquement trouver des défauts dans leurs canalisations pendant les inspections et l'opération normale et l'entretien. Le défaut a pu avoir été provoqué par des dommages d'excavation, la corrosion, des erreurs de construction, ou le processus de fabrication. Des manchons ou les brides en acier de réparation ont été typiquement utilisées pour réparer des dommages de canalisation ou des défauts ou la section endommagée ont été arrêtés et remplacés. Une fois correctement appliquée le manchon composé de clockspring reconstitue la canalisation à la condition de fonctionnement sûre sans devoir arrêter et remplacer la canalisation. Les manchons composés de clockspring sont utilisés pour dépanner provisoires et permanents sur le gaz naturel et les canalisations liquides. La phase d'installation de clockspring selon les figures 32 [38]

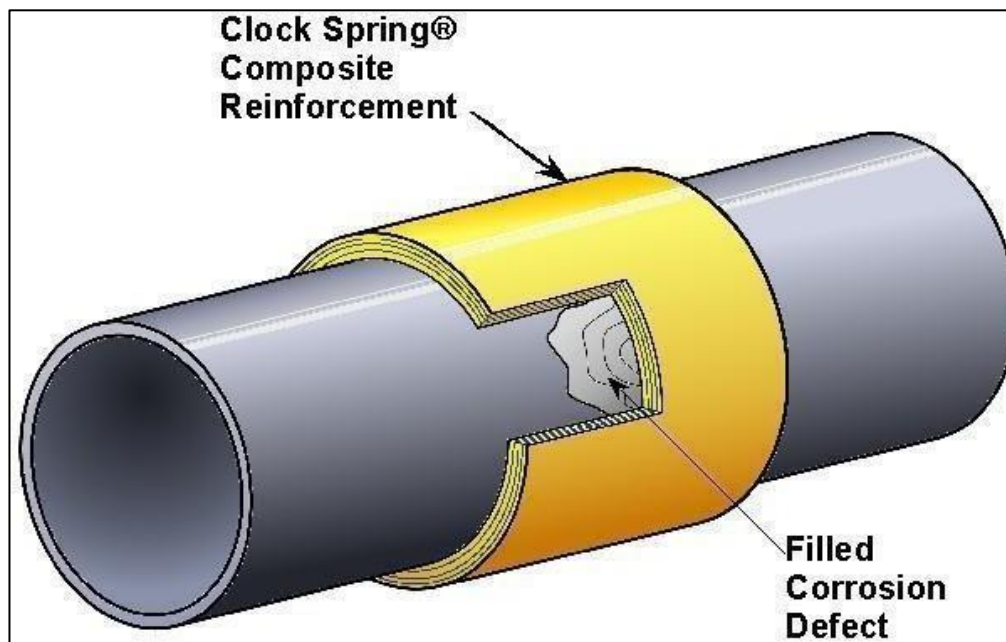
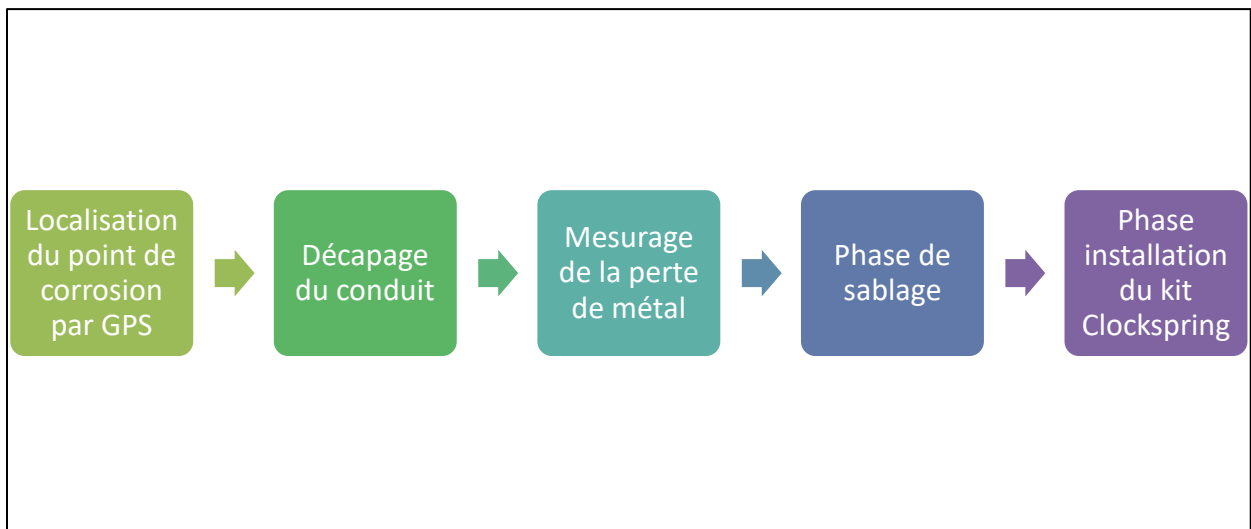


Figure 32: Réparation par clockspring

Installation de ClockSpring dans la STT :



PARTIE PRATIQUE

Chapitre I : L'arbre de défaillance

I.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 Haas, 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 [39].

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. [40].

Chapitre I : L'arbre de défaillance

Il existe un certain nombre de progiciels 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 [41]. Le Isograph's FaultTree + est un exemple de logiciel d'Add plus moderne, capable de dessiner et d'analyser des arbres de défaillance [42].

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 [43] comme étant : "Incapacité d'une entité à remplir une fonction requise."

Mais elle est définie par [44] 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

Chapitre I : L'arbre de défaillance

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 " [40].

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

Chapitre I : L'arbre de défaillance

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 32 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.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 OÙ), 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 32, 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 :

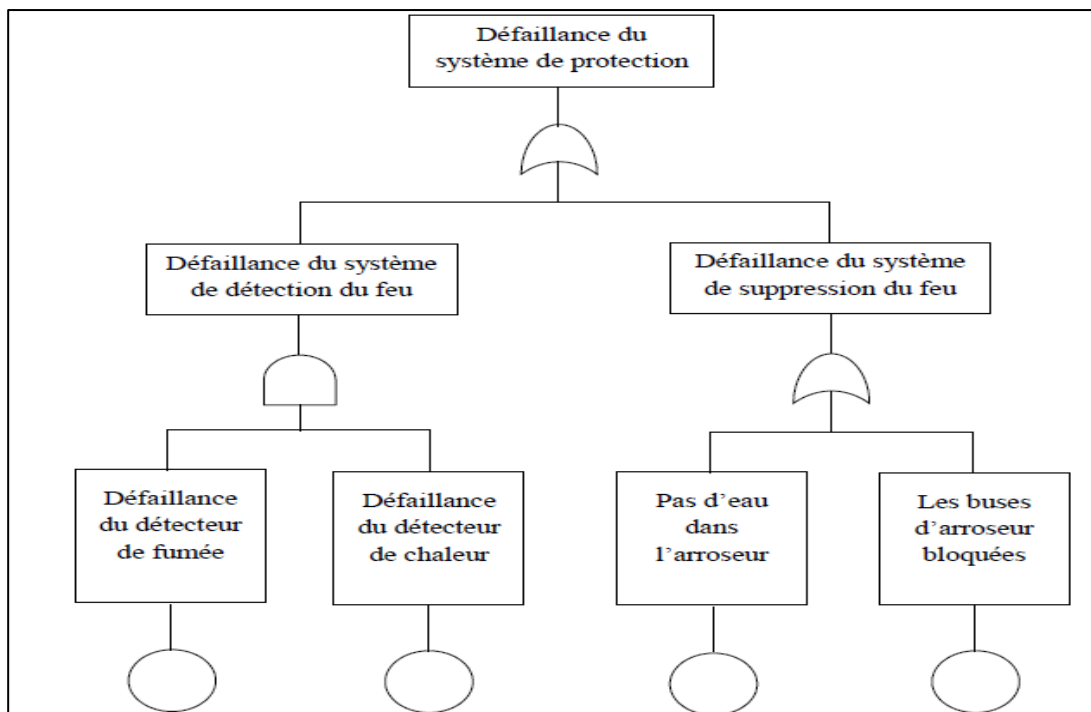


Figure 33 : Exemple simple d'arbre de défaillance

Chapitre I : L'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 :

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

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 : $\exists i : x_i = 1 \rightarrow \phi(x) = 1 \quad \forall i : x_i = 0 \rightarrow \phi(x) = 0$

Pour une porte ET, la fonction de structure donne 1 si toutes les entrées sont vraies et 0 si une entrée est fausse, c'est-à-dire : $\forall i : x_i = 1 \rightarrow \phi(x) = 1 \quad \exists i : x_i = 0 \rightarrow \phi(x) = 0$

Dans le cas de l'arbre de défaillance de la figure 32, 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 3 : La table de vérité booléenne

x_1	x_2	x_3	x_4	$\phi(x)$
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

Chapitre I : L'arbre de défaillance

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 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 : $\emptyset(1, xi) \neq \emptyset(0, xi)$

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

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

Si un élément xi 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 » [45]. 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

Chapitre I : L'arbre de défaillance

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 5ème 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 1er et le 2ème 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 1er 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 impliquants (analogues à des ensembles coupes) et plus important encore des impliquants 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 impliquant est un ensemble d'événements ou leurs compléments nécessaires pour provoquer l'événement supérieur, par exemple : A et B et non pas C. Les impliquants 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 impliquant premier est l'équivalent de l'ensemble de coupe minimal : c'est un impliquant qui ne contient aucun autre impliquant. Quelles que soient les différences, elles sont cependant utilisées de la même manière c'est-à-dire d'identifier les points faibles du système.

Chapitre I : L'arbre de défaillance

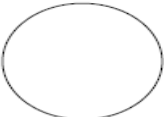
Bien qu'un arbre de défaillance soit purement un modèle qualitatif et transmet principalement la combinaison logique d'événements conduisant à une défaillance du système, il est également un modèle pratique à utiliser pour l'analyse quantitative, ce qui permet à l'analyste

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.



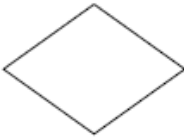
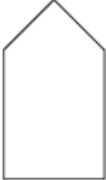

I. 3 Symboles utilisés dans l'arbre de défaillance

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. [40], et l'approche TFT de [46] 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.




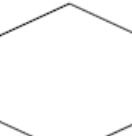

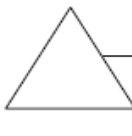
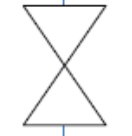
Tableau 4 : Symboles utilisés dans l'arbre de défaillance

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.

Chapitre I : L'arbre de défaillance

	<p>Événement intermédiaire</p> <p>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.</p>
	<p>Événement de conditionnement</p> <p>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.</p>
	<p>Événement non développé</p> <p>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.</p>
	<p>Événement externe</p> <p>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.</p>
	<p>Porte OU</p> <p>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.</p>

Chapitre I : L'arbre de défaillance

	<p>Porte ET</p> <p>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.</p>
	<p>Porte Priorité ET (PAND)</p> <p>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.</p>
	<p>Porte exclusive OU (XOR)</p> <p>La porte XOR est vraie si un seul et seulement un de ses événements d'entrée est vrai.</p>
	<p>Porte INHIBIT</p> <p>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.</p>
	<p>Transfère In</p> <p>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.</p>
	<p>Transfère Out</p> <p>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).</p>
	<p>Porte NOT ou événements complémentaires</p> <p>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.</p>

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 [47].

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 [48]. 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 commune étant donné que l'herbe de M. Holmes est humide [49].

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 33 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 [49].

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

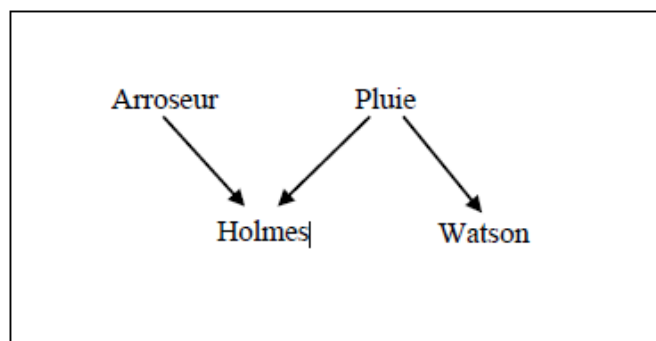


Figure 34 : Un modèle graphique pour l'herbe humide

À partir du graphique de la figure 33, 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 [50] et Verna 1987 [51]. 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 35 montre tout type de connexions dans un réseau causal.

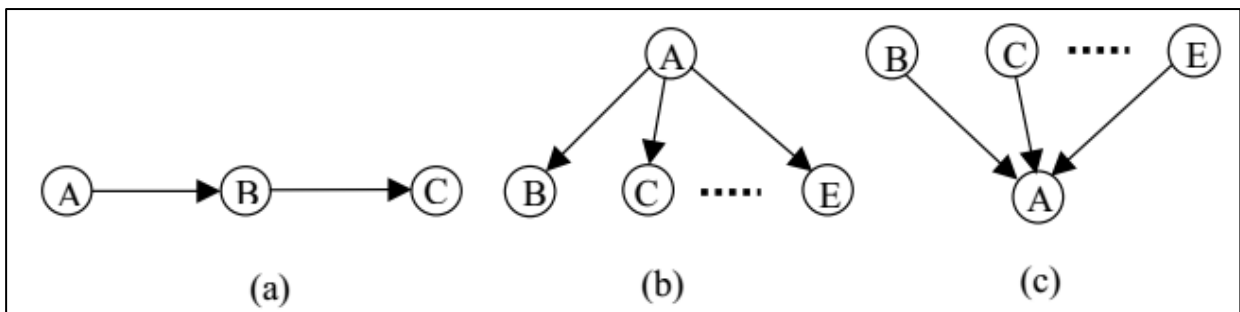


Figure 35 : Connexions en série, divergentes et convergentes respectivement

Dans la figure 34 (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 34 (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 34 (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 [52] 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 [49].

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 ; où
- La connexion convergente et ni V ni aucun des descendants de V

S'ils n'ont reçu de preuve [49]. 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 35 (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 34, 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 [52], 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[49] ;

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

Où $P(A, B)$ Est la probabilité de l'événement conjoint $A \cap B$. 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 :

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

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

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

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 :

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

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 $P(A \mid B)$ est une table n-par-m composée des nombres $P(a_i \mid b_j)$. Cette table est appelée table de probabilité conditionnelle (TPC) pour $P(A \mid B)$.

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) :

$$P(a_i, b_j) = P(a_i \mid b_j)P(b_j)$$

Ou de manière équivalente,

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

La probabilité conjointe, $P(A, B)$, a $n \cdot m$ 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 [52] fournit un moyen d'évaluer cette probabilité par comparaison au jeu [49].

La probabilité subjective est également appelée probabilité bayésienne ou probabilité personnelle dans la littérature [53]. 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 [53].

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 [53].

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 [49].

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 35, les probabilités antérieures $P(A)$ et $P(B)$ doivent être spécifiées.

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 [42]. 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 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.

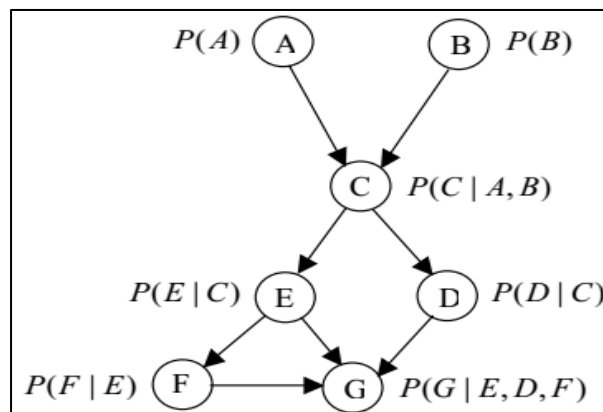


Figure 36: Un graphe acyclique dirigé

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 [49].

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 [42] a prouvé ce théorème en appliquant l'induction sur le nombre de variables dans l'univers U [39]. 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 [54], [55]. 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 [56] et la méthode de conditionnement en boucle, qui est expliquée dans [52], (Pearl 1988) [49]. Des méthodes d'apprentissage ont également été proposées pour la mise à jour systématique des probabilités conditionnelles $P(X_i | pai)$, ainsi que la structure du réseau afin de faire correspondre les données empiriques [57]. 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 » [47].

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 33 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 [58] et pourraient faire de bonnes prédictions même avec de petites tailles de données [59]. 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 » [60].

Bien que les réseaux bayésiens soient de plus en plus appliqués dans divers domaines tels que la science de l'environnement [58], [61], [62], la gestion des ressources en eau [63], et l'agriculture [64], quelques applications en ingénierie géotechnique : [65], analyse de la liquéfaction des sols sur la base des RB ; [69] ont développé un modèle de réseau bayésien pour caractériser l'incertitude des modèles d'évaluation de la liquéfaction [67] ont utilisés les RB pour évaluer les risques liés à la circulation dans les tunnels routiers ; [60] ont présenté un cadre d'aide à la décision basé sur les RB pour évaluer les risques dans la construction des tunnels [68] ont élaboré un modèle RB pour prédire le règlement au sol dans la construction de tunnels blindés ; [69] 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 [70].

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.

En (2001) [71] 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.

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 [73].

Des contributions complémentaires ont été apportées par Cornalba et Giudici [74] 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. [75] 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. [69] démontre les avantages du RB pour l'application dans l'évaluation des risques naturels. [77] 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. [78] 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. [79] 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.

On 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 [81] 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 [82] 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, [83] 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.

On 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. [85] 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 Lagoune. [86], 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 Étapes de modélisation d'un réseau bayésien

Il y a deux étapes principales pour la modélisation de RB [87] :

-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

- 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 [88].

II.7 .1 Convertir Arbre de défaillance à Réseau bayésien :

Les opérations de l'algorithme pour obtenir une RB à partir d'un ADD sont données ci-dessous. On suppose que la ADD n'aura que des portes « OU » et « ET », le RB résultant sera par binaire, les variables représentent les états des composantes d'un système et les deux valeurs qu'ils peuvent assumer être étiqueté avec FAUX (F) pour l'état de fonctionnement, et avec VRAI (V) pour l'état défaillant. Cependant, l'algorithme peut être généralisé à n'importe quel ADD.

II.7 .2 Concernant la partie qualitative du RB :

1. Tout évènements de base du ADD correspond à un nœud racine (parent) dans le RB.
2. Toute porte du ADD avec l'évènements sommet ou intermédiaire correspond à un nœud intermédiaire.
3. L'évènement sommet correspond à un nœud pivot 'feuille' dans le RB, en particulier la dernière porte logique et l'évènement sommet finale de ADD sera étiquetée en tant que nœud de défaillance.
4. Les nœuds dans le RB doivent être connectés comme les portes dans le ADD.

La figure 36 montre comment :

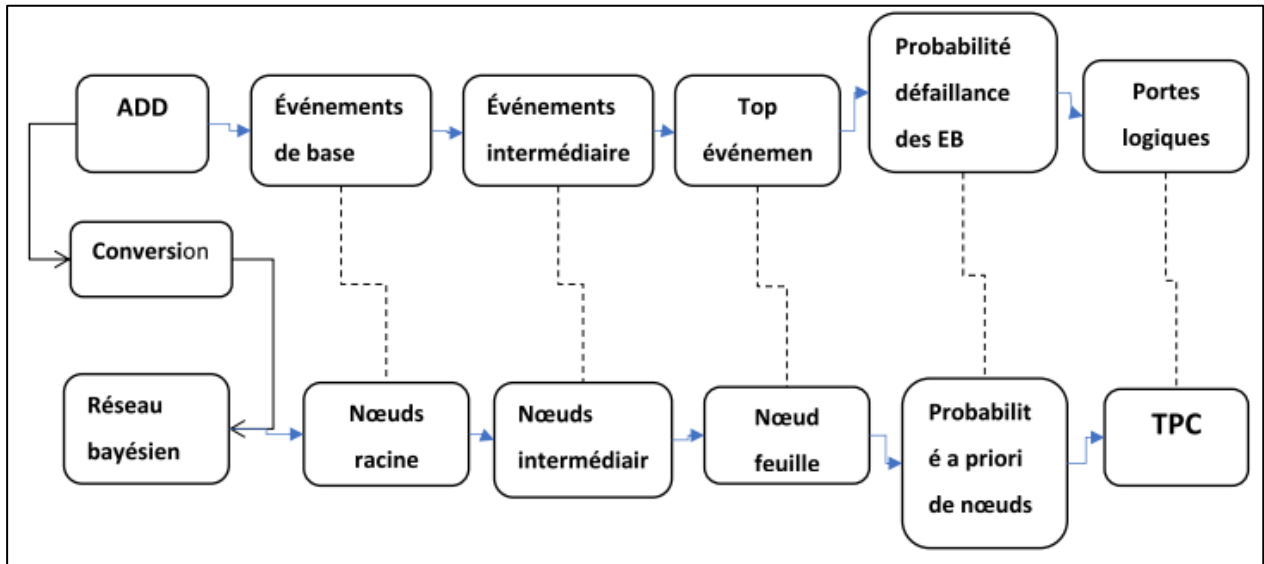


Figure 37 : Organigramme représentant un algorithme simplifié pour représenter un Arbre de défaillance au Réseau Bayésien

II.7 .3 Concernant la probabilité, la partie quantitative du RB :

1. À tout nœud racine du RB, il se voit attribuer la même probabilité priori (antérieure) de son événement de base correspondant dans le ADD.
2. À tout nœud du RB correspondant à une porte ET du ADD, il est associé un TPC tel que le nœud soit VRAI avec une probabilité 1 si et seulement si tous les parents sont VRAI
3. À tout nœud du RB correspondant à une porte OU du ADD, il est associé un TPC tel que le nœud est VRAI avec probabilité 1 si et seulement si au moins un de ses parents est VRAI.[89]

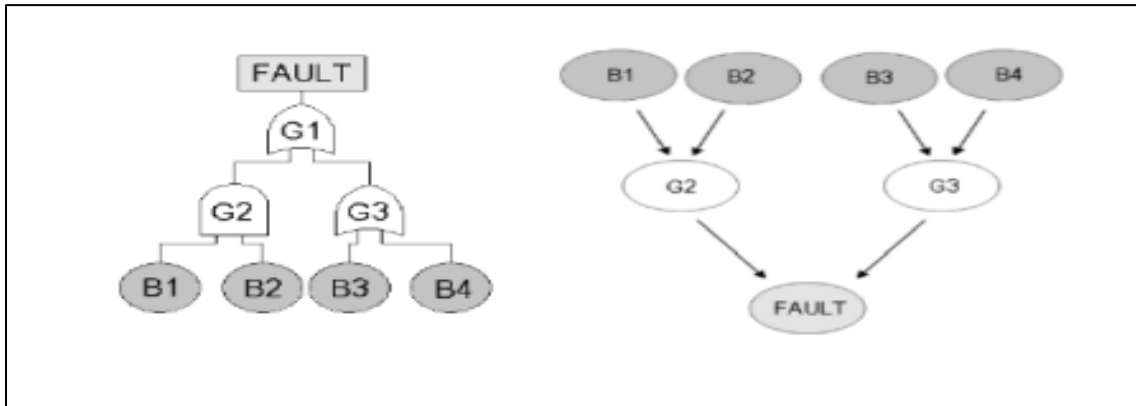


Figure 38 : Les événements de base B1, B2, B3 et B4 correspondent aux nœuds racines

Les portes G2 et G3 correspondent aux nœuds intermédiaires G2 et G3 et l'événement « FAULT » correspond au nœud de défaillance. [89]

Tableau 5 : test périodique simple correspondant à une porte ET

Assessment (Model: Model_ADD, Node: G2_AND)				
Parent Node(s)		G2_AND		
B1	B2	Yes	No	bar charts
Yes	Yes	1,0	0,0	
	No	0,0	1,0	
No	Yes	0,0	1,0	
	No	0,0	1,0	

Pour une porte ET, telle que G2 sur le tableau 5, le TPC donnera le résultat de la figure
 Pour une porte OU, telle que G3 sur le tableau 6, le TPC sera celui de la figure

Tableau 6 : test périodique simple correspondant à une porte OÙ.

Assessment (Model: Model_ADD, Node: G3_OR)				
Parent Node(s)		G3_OR		
B3	B4	Yes	No	bar charts
Yes	Yes	1,0	0,0	
	No	1,0	0,0	
No	Yes	1,0	0,0	
	No	0,0	1,0	

La méthode de conversion peut être étendue aux ADD avec d'autres portes et les TPC des réseaux correspondants suivront les tables logiques des portes.

CHAPITRE III :

Application l'étude de cas

III .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 [90]. 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.

L'explosion des pipelines (EP) 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 EP (explosion d'un pipe) 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.

L'arbre de défaillance est une méthode importante pour analyser la sécurité de système [91]. 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) [92]. 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 [93]. Les portes ET combinent les événements d'entrée qui doivent exister simultanément

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

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. et Pour connaître les conséquences.

III .2 réseaux 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 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 38 présente une vue schématique du système 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 :

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

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

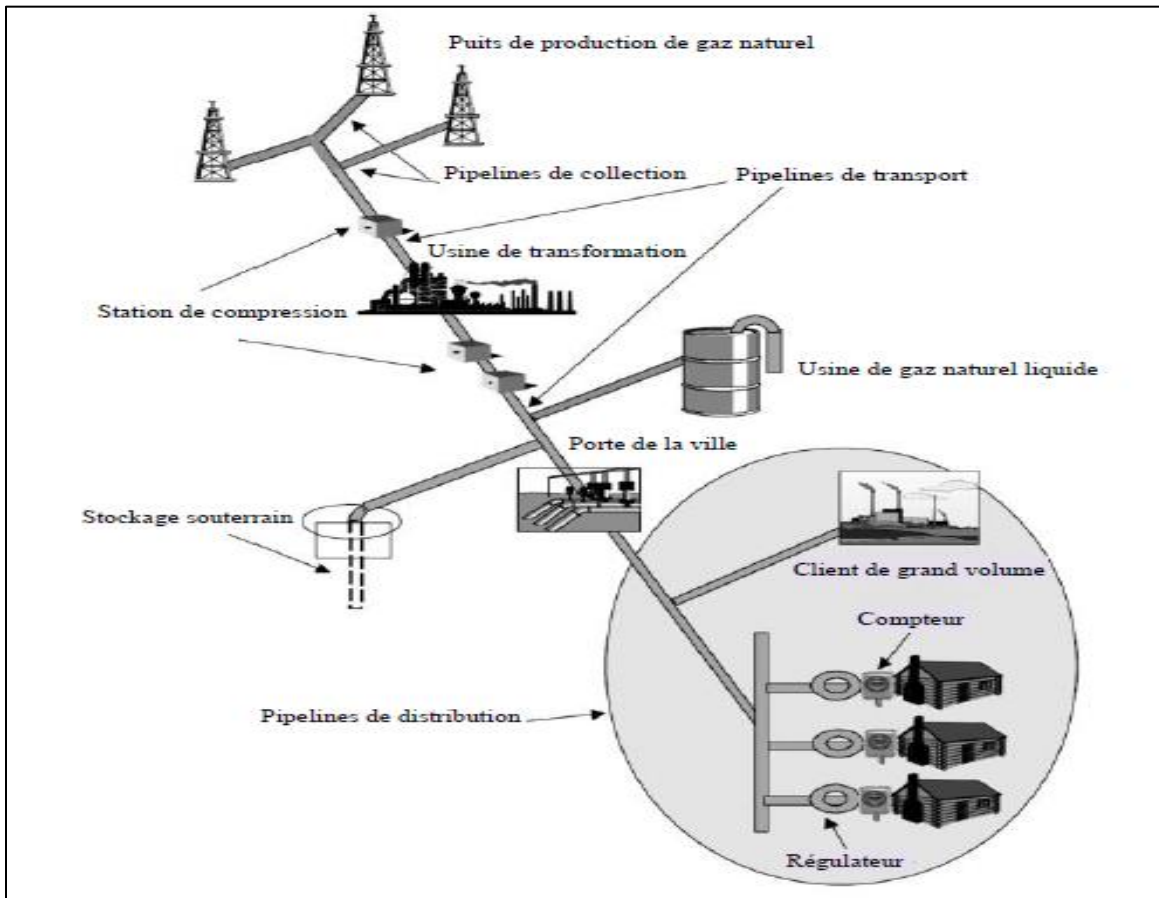


Figure 39 : Composants du réseau de pipelines

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

III.2.1 Construction de l'arbre de défaillance pour l'explosion d'un pipeline

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 à l'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 OÙ. 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 7. Enfin, un arbre de défaillance complet du EP est réalisé comme il est montré dans la Figure 38. L'arbre de défaillance proposé comprend 72 événements basiques qui contribuent à l'apparition de l'accident.

Tableau 7 : 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	H2S	X61	Ne pas installer des dispositifs de Mise à la terre antistatique
X6	O2	X62	Résistance de terre non standard
X7	CO2	X63	Fil de prise de terre brisé
X8	Coups de bélier	X64	Appareil non-standard

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

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

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

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	Déflecteur 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 où Photographique	N39	Accumulation de charges Electrostatiques
X56	Moniteur et détecteur	N40	Terre imparfaite
/	/	N41	Erreur de mesure

III 2.2 La logique floue

La théorie des ensembles flous est d'abord introduite par Zadeh [94] 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, sa fonction d'appartenance est donnée par l'équation (IV.1) :

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

Les estimations floues peuvent être agrégées par une probabilité floue unique définie comme $\tilde{P}(t) = (b - d_1, b, b + d_2)$ qui correspond la meilleure estimation de tous les experts [95], où :

$$d_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{1i}$$

$$b = \frac{\min_{1 \leq i \leq n} a_i + \max_{1 \leq i \leq n} a_i}{2}$$

$$d_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{2i}$$

III.2.1 Description des causes de l'explosion d'un pipe

Corrosion externe :

- Protection cathodique défaillante
- Défaillance du revêtement
- Corrosion du sol (haute température, faible résistance, ratio d'eau élevé, sel élevé, bactéries, faible pH, interférence électrique)
- Anti-corrosion
- Environnement souterrain
- Corrosion mécanique (niveau de contrainte, contraint cyclique, température, revêtement, protection cathodique, pH)

Potentiel d'interférence (courant continu et courant alternatif potentiel de blindage).

Corrosion interne :

- Défaillance d'un inhibiteur
- Défaillance du revêtement
- Décollement, Milieu corrosif
- Décollage inter facial
- Milieu corrosif
- Mauvais tuyau
- Milieu (avec de l'eau ou de l'acide)

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

- Caractéristiques du débit

Défauts de construction et de matériel :

- Défaut de construction
- Défaut matériel
- Défaut de fonctionnement (mauvaise installation, soudure, rainure, dommages mécaniques)

Opération incorrecte :

- Qualité du travailleur
- Maintenance de l'équipement
- Maintenance des appareils
- Programme de sécurité Enquête
- Entraînement
- Prévention des erreurs mécaniques

Mauvais désigne :

- Force déraisonnable
- Matériel inapproprié
- 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

Risques naturels :

- Les mouvements de terrain (secousses sismiques,
- Mouvements de défauts, affaissement, glissement de terrain, érosion berges)

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

- Tremblement de terre
- Inondation
- Affaissement

Tableau 8 : Description des conséquences de l'explosion d'un pipe

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

III.3 présentation logiciel Isograph Reliability Workbench. Version

14.0. Incorporating Fault Tree+

Isograph Reliability Workbench est un logiciel d'analyse et de test de sécurité et de fiabilité publié par Isograph Software Company. Ce logiciel et d'autres suites logicielles connexes sont en cours de développement et de dépannage depuis 1980 et sont aujourd'hui devenus une norme complète dans le domaine des tests de fiabilité et de sécurité.

Ce logiciel pour diverses raisons telles que des prévisions précises dans le domaine de l'analyse et de l'examen de la fiabilité et de la fiabilité de divers systèmes, la prise en charge des données et des méthodes d'information existantes, l'analyse de la sécurité au niveau macro et de l'entreprise, et... à l'un des logiciels les plus populaires Les logiciels de test de sécurité et de stabilité sont devenus populaires auprès des spécialistes et des ingénieurs. Ce logiciel se compose de 10 modules distincts, chacun ayant des applications et des capacités uniques.

III.3.1 FONCTIONNALITÉS ET CARACTÉRISTIQUES DU LOGICIEL ISOGRAPH RELIABILITY WORKBENCH

- Schéma fonctionnel de la fiabilité analyse
- Analyse de l'arbre de défaillance

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

- Analyse de signification
- Analyse de cause commune
- Analyse d'arbre d'événements avec plusieurs catégories de risques
- Analyse de Markov avec capacité de modélisation multi-phases-multi-étapes
- Prise en charge de diverses normes dans le domaine de l'analyse des systèmes (analyse des systèmes) telles que ARP 4761, CEI 61508 et ISO 26262
- Prédire la fiabilité et la fiabilité de divers composants électroniques et mécaniques à l'aide des normes MIL-217, Quanterion 217 Plus, SN29500, IEC 61709, FIDES, Telcordia TR / SR, IEC TR 62380, GJB299C et NSWC
- Analyse des modes de défaillance et des effets
- Analyse AMDEC

III.2 Arbre de défaillance avec logiciel isograph

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

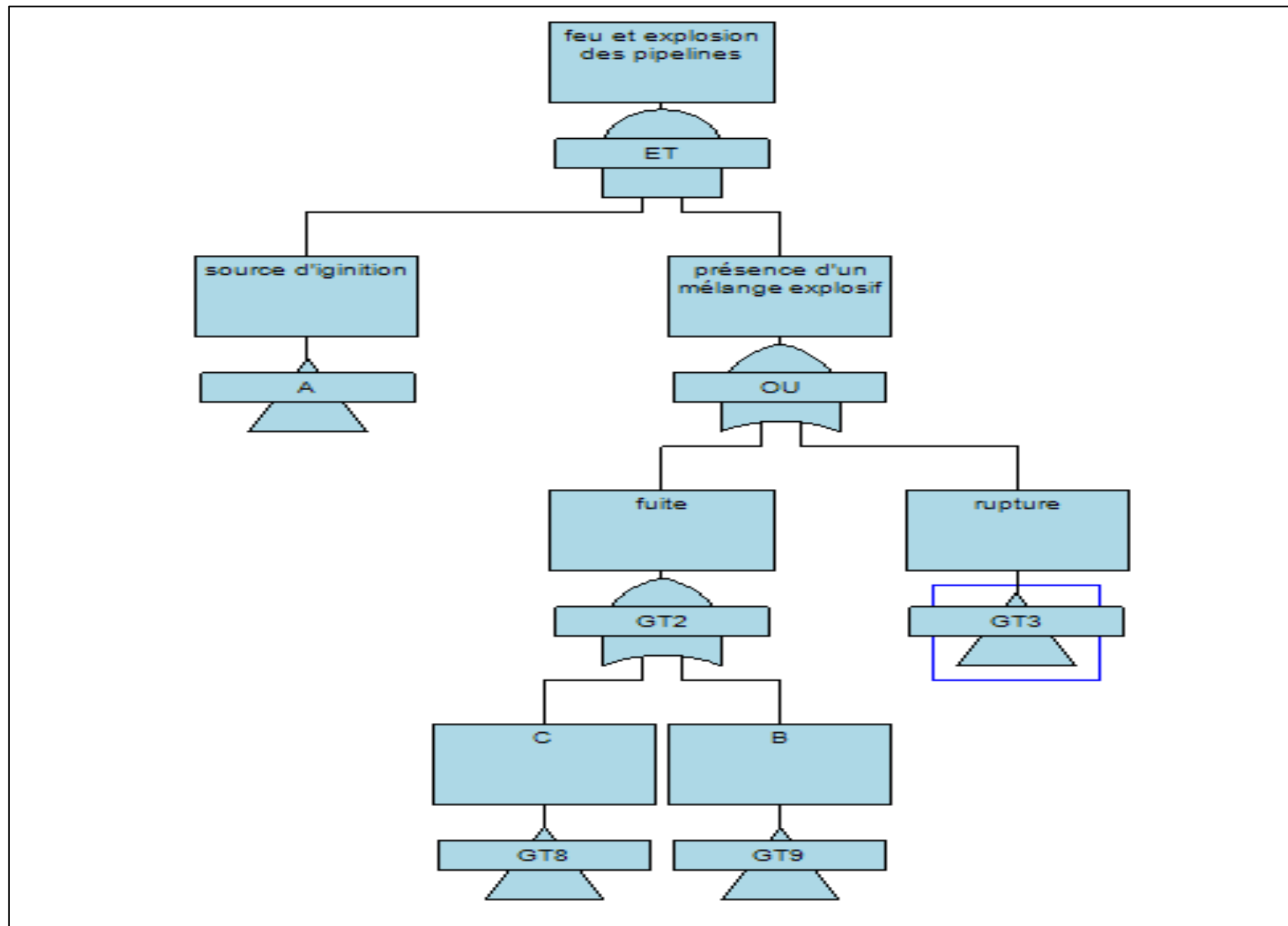


Figure 40 : arbre de défaillance avec logiciel isograph (arbre principal)

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

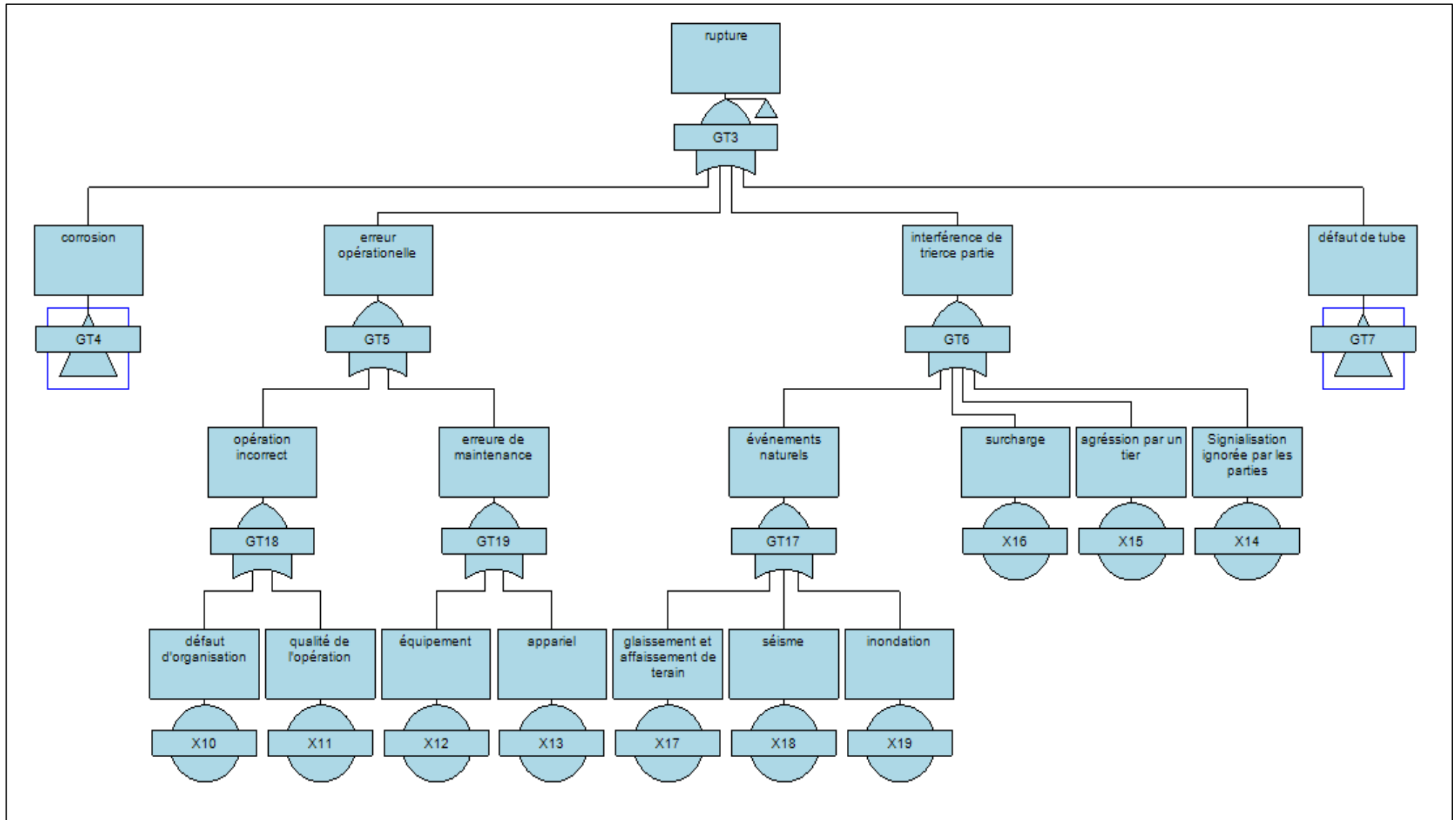


Figure 41 : arbre de défaillance avec logiciel isograph [GT3(rupture)]

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

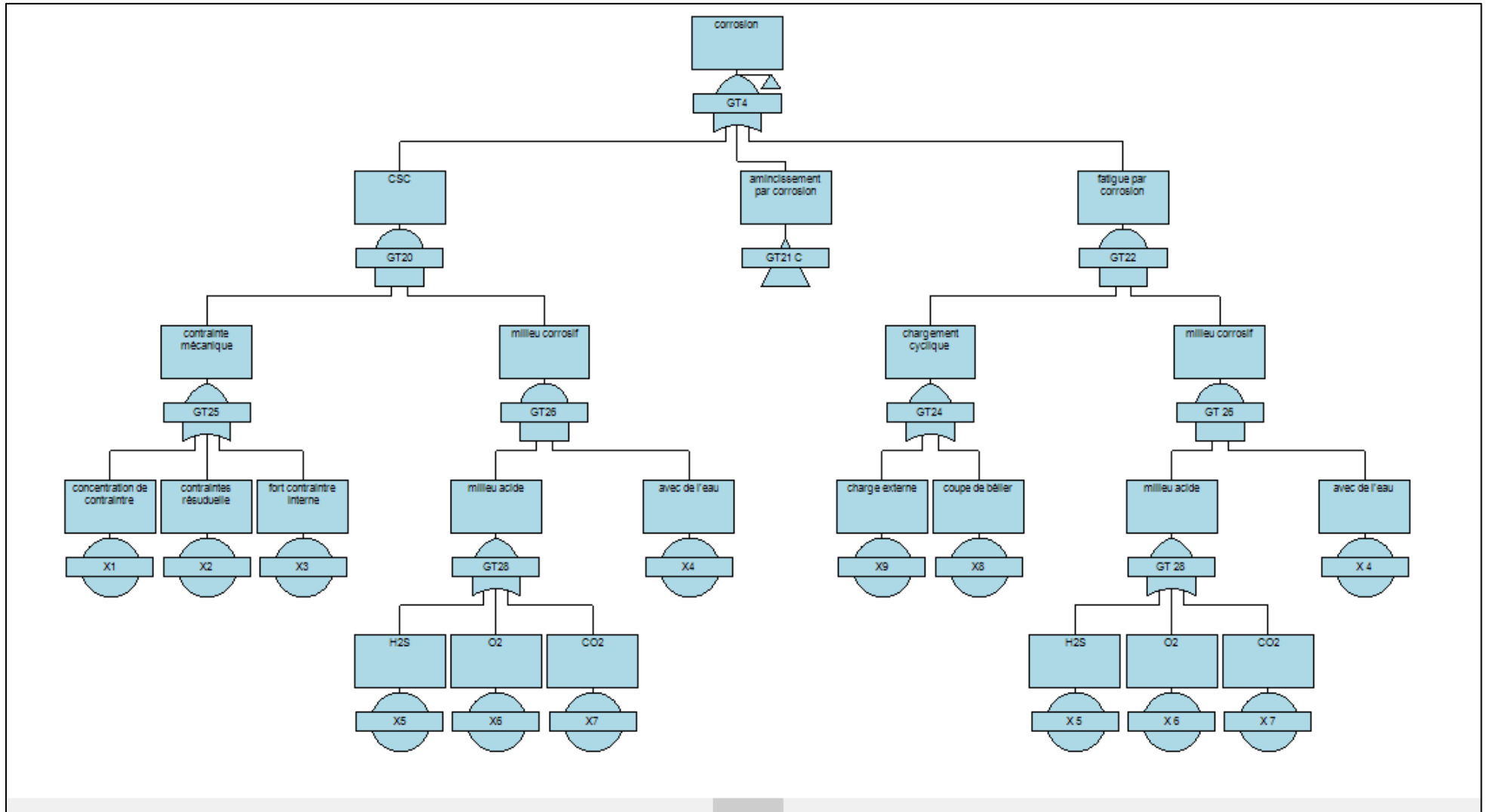


Figure 42 : arbre de défaillance avec logiciel isograph [GT4(corrosion)]

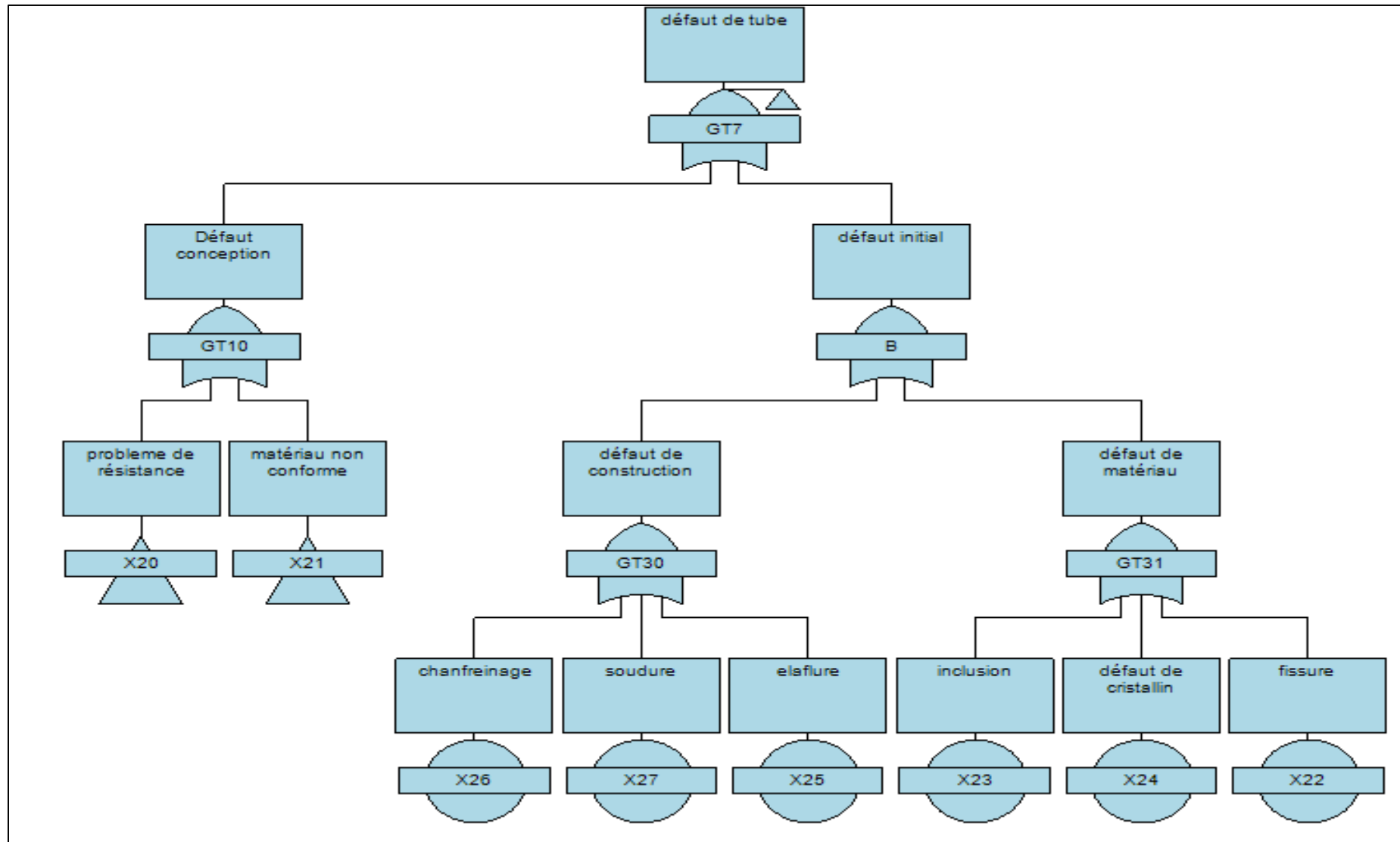


Figure 43 : arbre de défaillance avec logiciel isograph [GT7 (défaut de tube)]

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

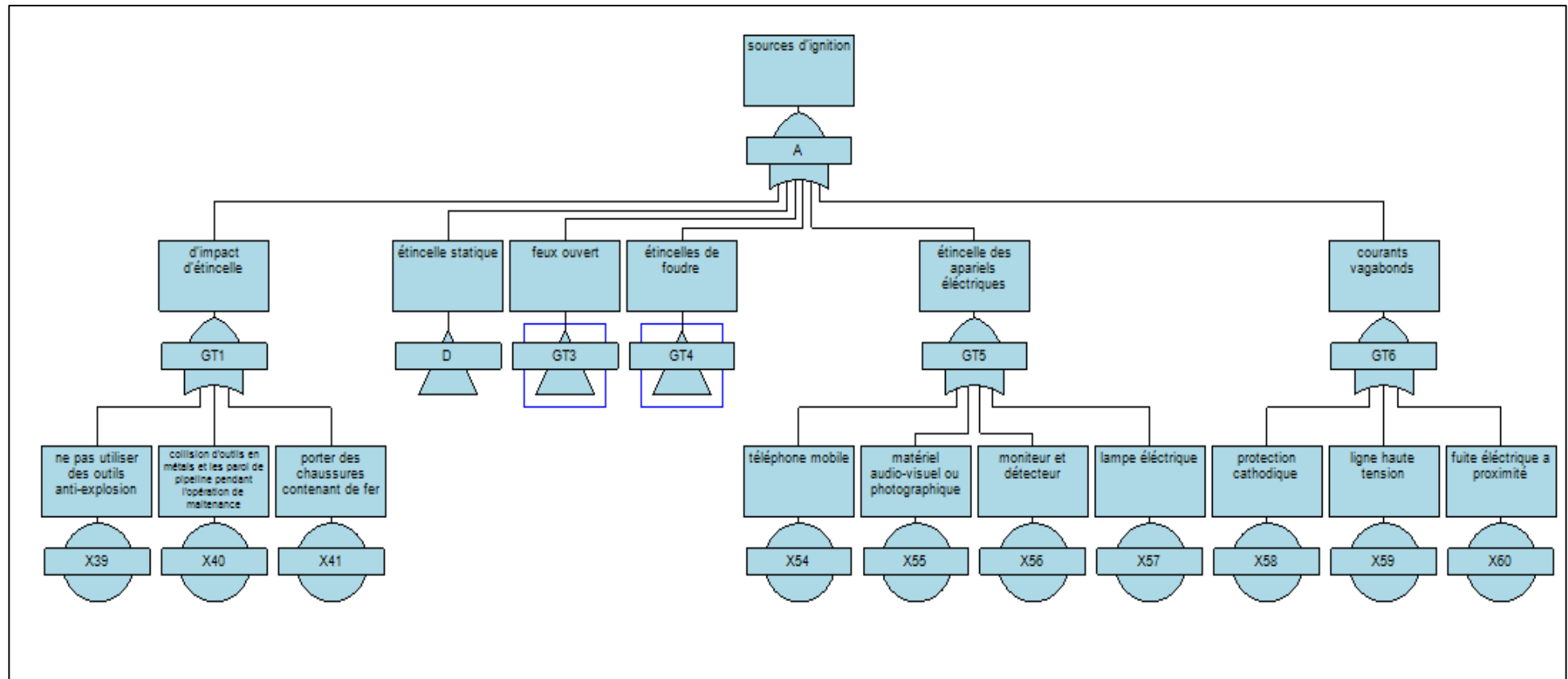


Figure 44 : arbre de défaillance avec logiciel isograph [A (sources d'ignition)]

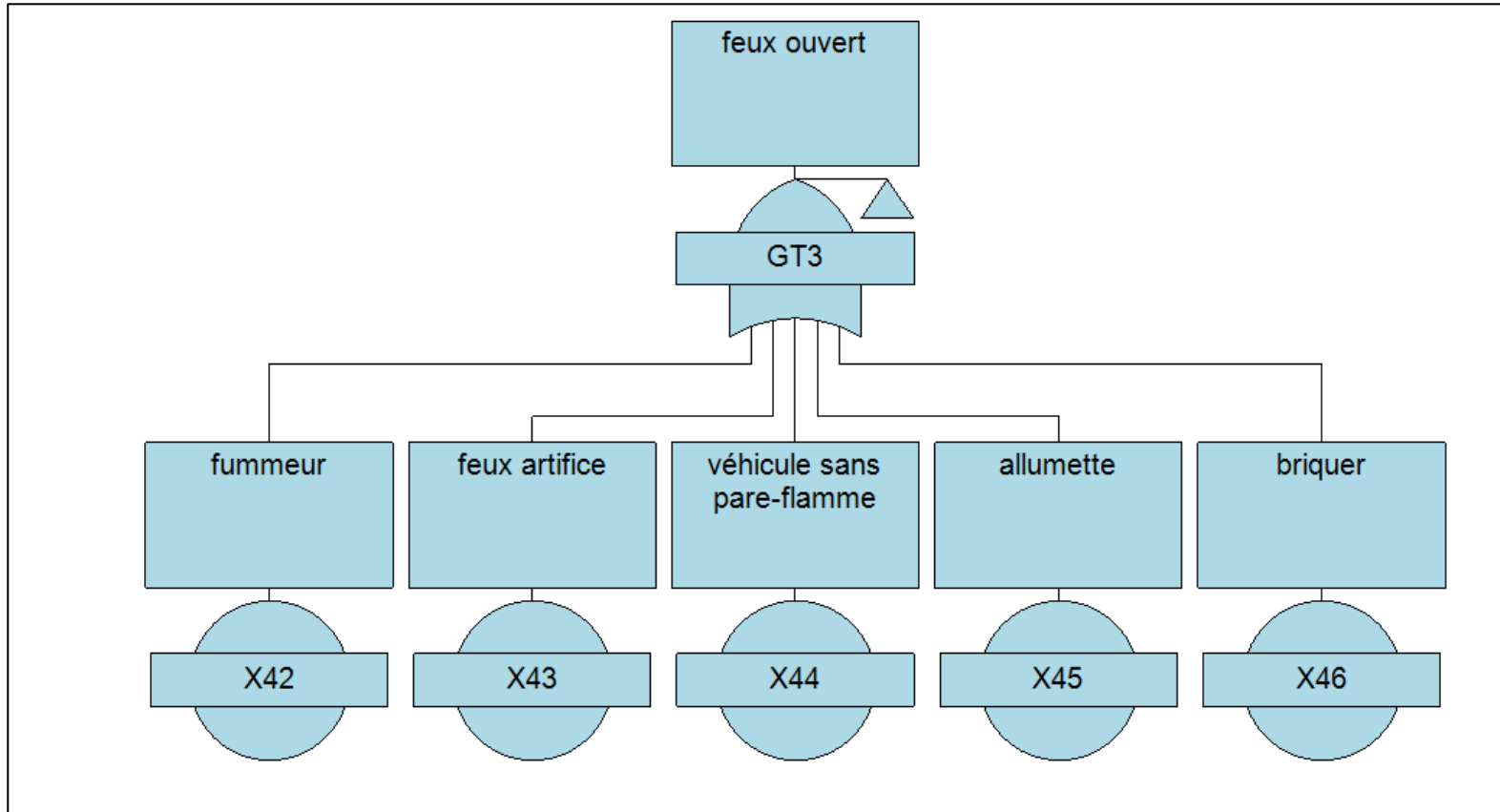


Figure 45 : arbre de défaillance GT3 feu ouvert de la source d'ignition avec logiciel isograph

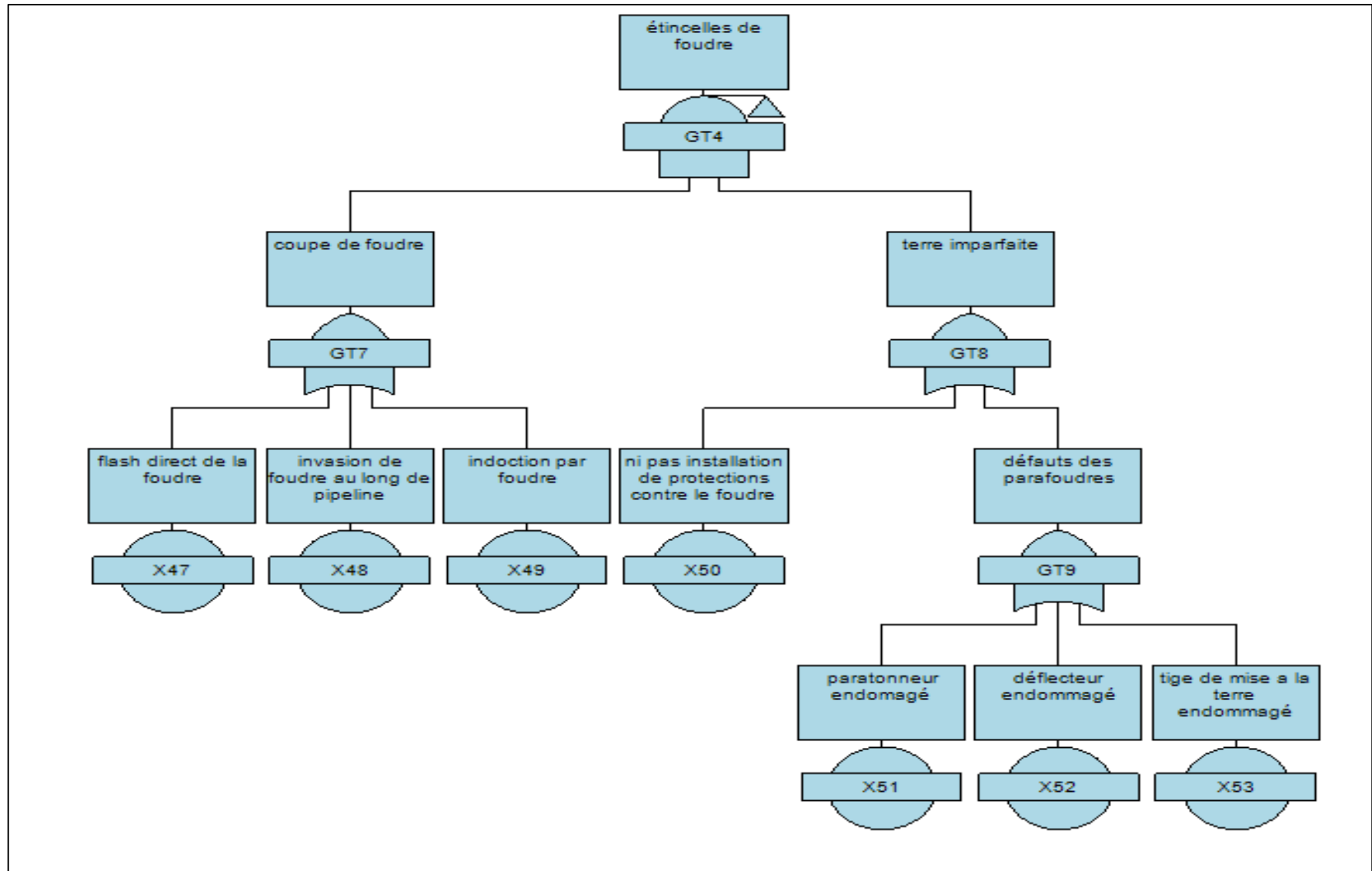


Figure 46: arbre de défaillance GT4 étincelles de foudre de la source d'ignition porte [A] avec logiciel isograph

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

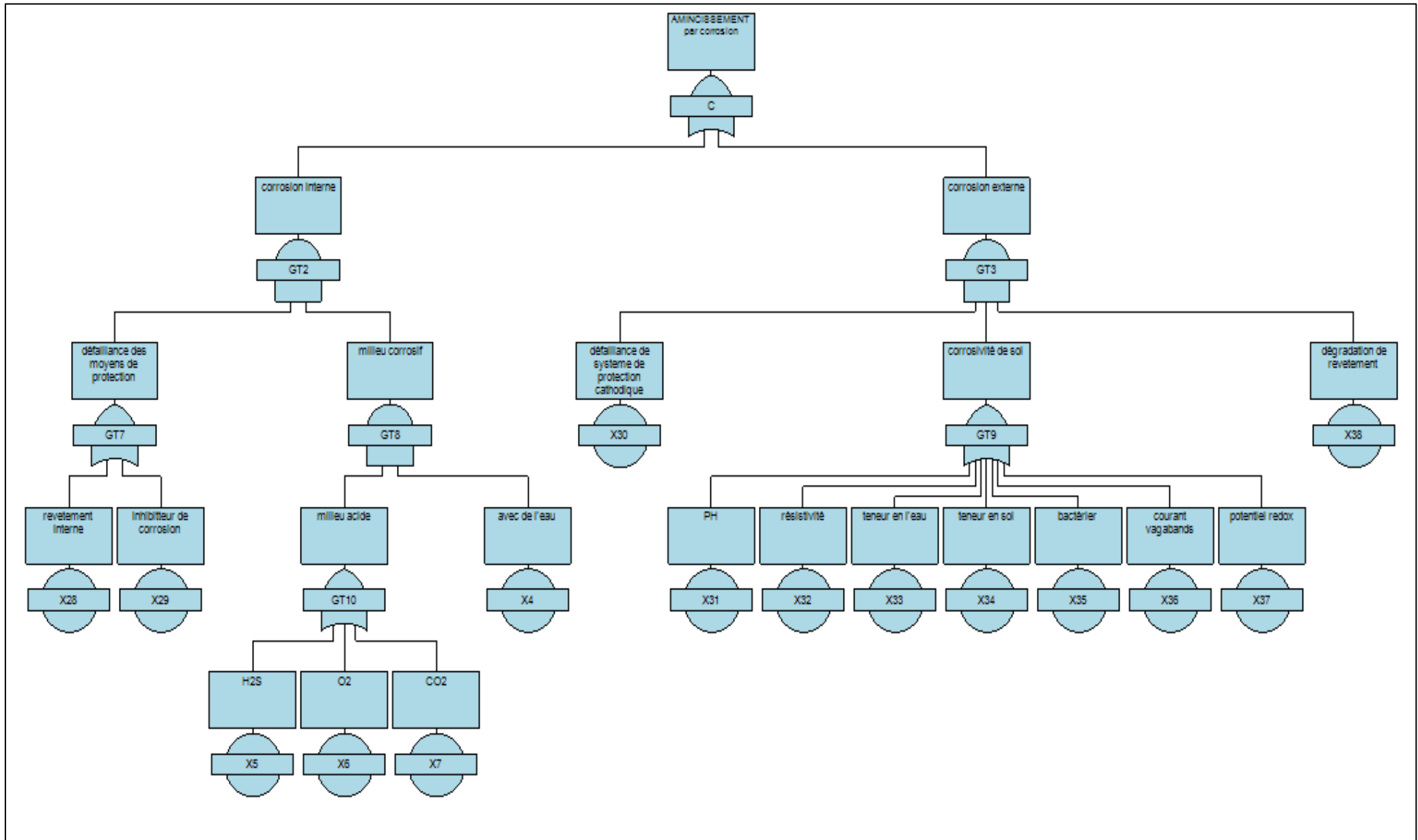


Figure 47 : arbre de défaillance amincissement par corrosion porte [C] avec logiciel isograph

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

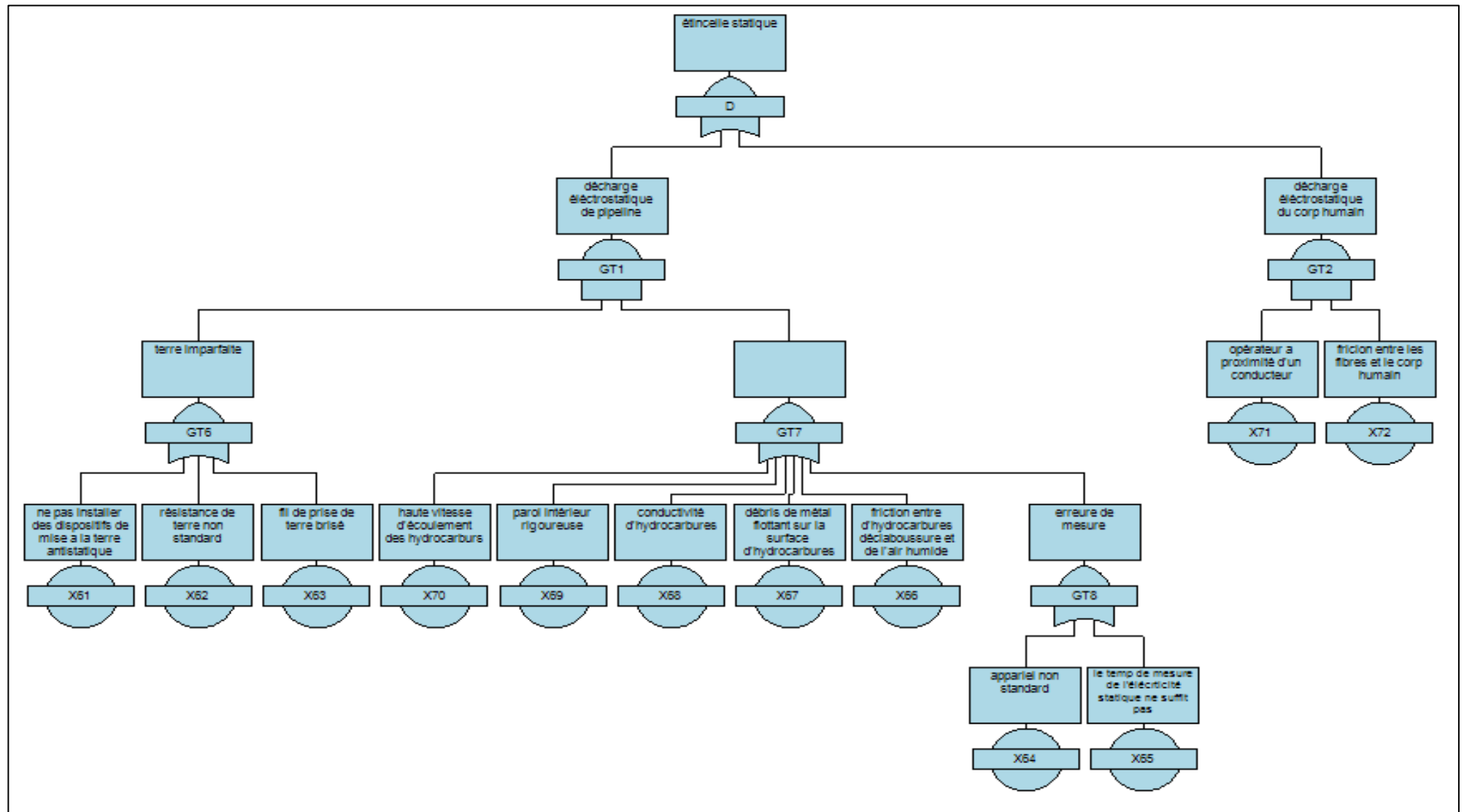


Figure 48 : arbre de défaillance d'étincelle statique porte [D] avec logiciel isograph

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

III 3.3 Les évènements de base qui conduisent à l'explosion des pipes

Dans cette étude et à travers l'arbre de défaillance nous avons trouvé 72 évènements de base pour estimer comme causes primaires provoquant l'occurrence d'évènement indésirable (l'explosion du pipelines) ils ont tous un rôle dans l'accident(l'explosion des pipelines) et l'explosion des pipelines se se produit rarement a moins que les EB ne se multiplient dessus, L'arbre de défaillance proposé comprend 72 évènements basiques qui contribuent à l'apparition de l'accident (L'explosion du pipelines) et ils disposés dans le tableau 7 :

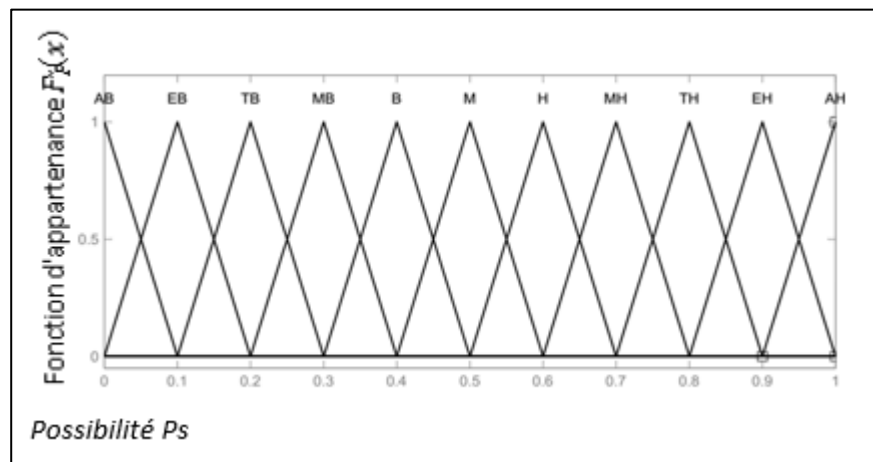


Figure 49 : Echelle floue des possibilités des évènements basiques

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 : $\tilde{P}(t) = (a_i - c_{1i}, a_i, a_i + c_{2i})$

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

$$\underline{d}_1 = \frac{0.1 + 0.1 + 0.1}{3} = 0.1$$

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

$$\underline{d}_2 = \frac{0.1 + 0.1 + 0.1}{3} = 0.1$$

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.

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

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

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

X^* : Sortie de fuzzifiée ;

$u_i(x)$: 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 :

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

a suggéré l'équation (7) pour convertir la possibilité (P_s) trouver après la [96] défuzzification à une

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

probabilité d'occurrence (Pr) :

Où :

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

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)}.

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

En cas d'incendie : FGDPS = 0,3, FFDPS = 0,11.

En cas d'absence d'incendie : FGDPS = 0,2, FFDPS = 0,2.

III.3.4 Les barrières de sécurité

III.3.4.1 FDPS (détecteur de gaz)

La détection feu (incendie) et gaz est de nos jours utilisée comme moyen de protection actif contre des événements accidentels graves pouvant conduire jusqu'à la destruction partielle ou totale d'une installation, d'un site industriel. Mais la détection peut également permettre de sauver des vies, préserver un environnement et de conserver la renommée d'une entreprise. En effet, lorsqu'un système de détection incendie / feu et gaz est bien pensé, il constitue un véritable allié à la démarche de maîtrise des risques industriels.

C'est pourquoi, tout industriel, ingénieries ou bureau d'étude doit mener des études de détection incendie / feu et gaz dès lors qu'une suspicion de présence de matières dangereuses (inflammable, explosif, toxique) est identifiée

III.3.4.2 GDPS (système de protection)

Détecteurs de fumée

Ce sont des équipements de sécurité incendie placés dans divers endroits d'un bâtiment. Ils émettent un signal sonore relativement fort dès qu'une fumée est détectée afin de prévenir les occupants.

Alarme incendie

Il s'agit d'un système regroupant plusieurs détecteurs comme le détecteur de fumée, le détecteur de chaleur, une centrale et des sirènes d'où émane un signal d'avertissement sonore.

Robinets d'incendie

Désignés le plus souvent par RIA (robinets d'incendie armés). Il s'agit d'équipement fixé pour faire face à un feu déclaré.

Les probabilités d'occurrence des EB ont été estimées en utilisant la logique floue et sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Augments d'experts et valeurs de probabilité pour tous les événements de base

BE	Augment D'expert			Agrégation des nombres flous	Conversion	
	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>		<i>Ps</i>	<i>Pr</i>
X1	<i>EB</i>	<i>EB</i>	<i>TB</i>	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X2	<i>TB</i>	<i>TB</i>	<i>EB</i>	(0.05,0.15,0.25)	0.15	7.9016E-05
X3	<i>TB</i>	<i>MB</i>	<i>MB</i>	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158
X4	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>B</i>	(0.35,0.45,0.55)	0.45	0.003465941
X5	<i>TB</i>	<i>TB</i>	<i>MB</i>	(0.15,0.25,0.35)	0.25	0.000480158

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

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

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

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. FEP II 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 [97]. 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 l'appuyé sur le bouton Run. Par exemple, l'occurrence de l'ES (FEP) doit être l'occurrence des deux événements (N2 et N3) ensemble (49).

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

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

$$(FEP) = 0.48422 * 0.41738$$

$$(FEP) = 0.2021$$

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

C'est le même résultat obtenu avec le logiciel Agena (Figure 50).

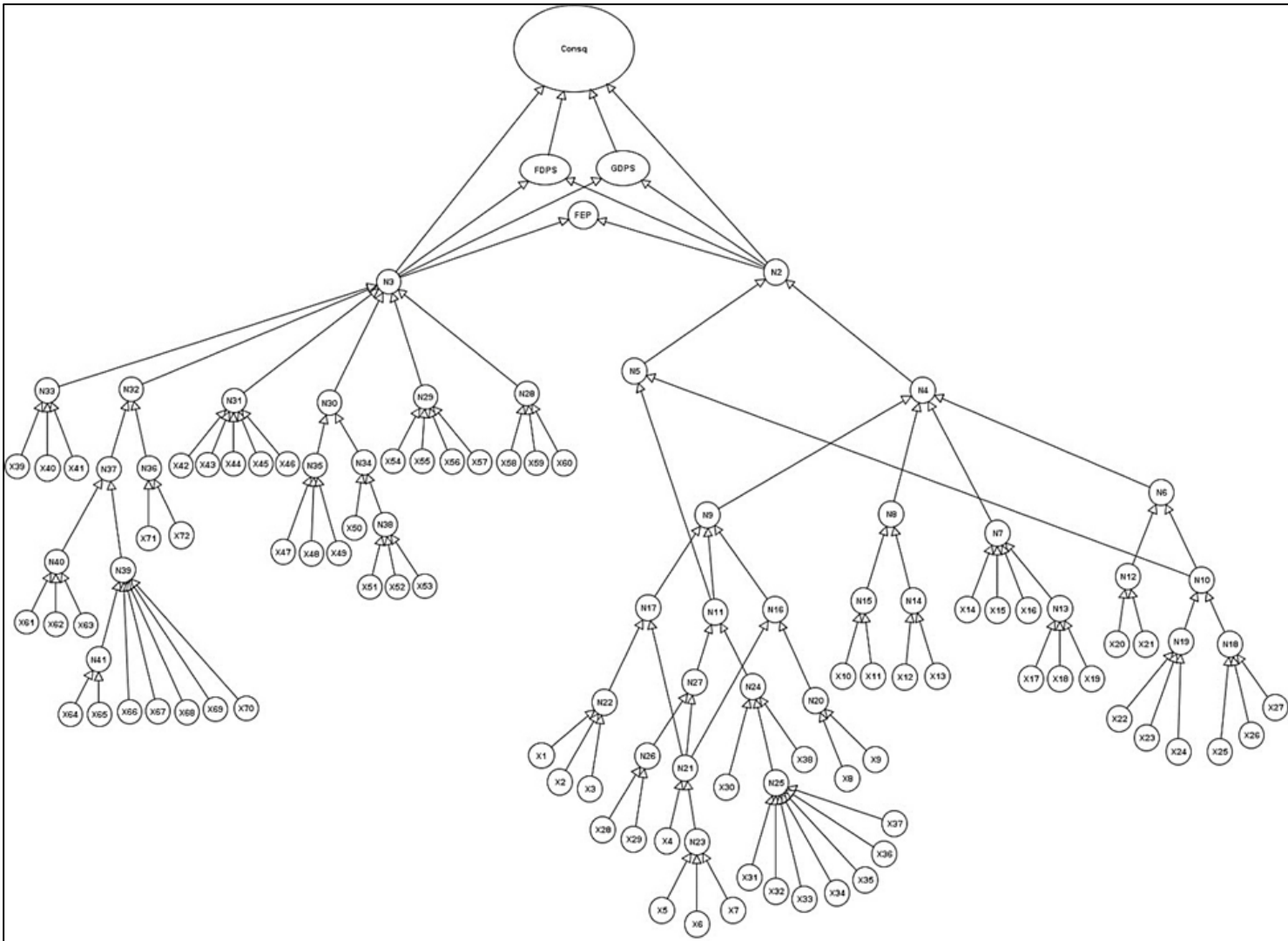


Figure 50 : événement de base dans le logiciel Agena.

CHAPITRE III : Application l'étude de cas

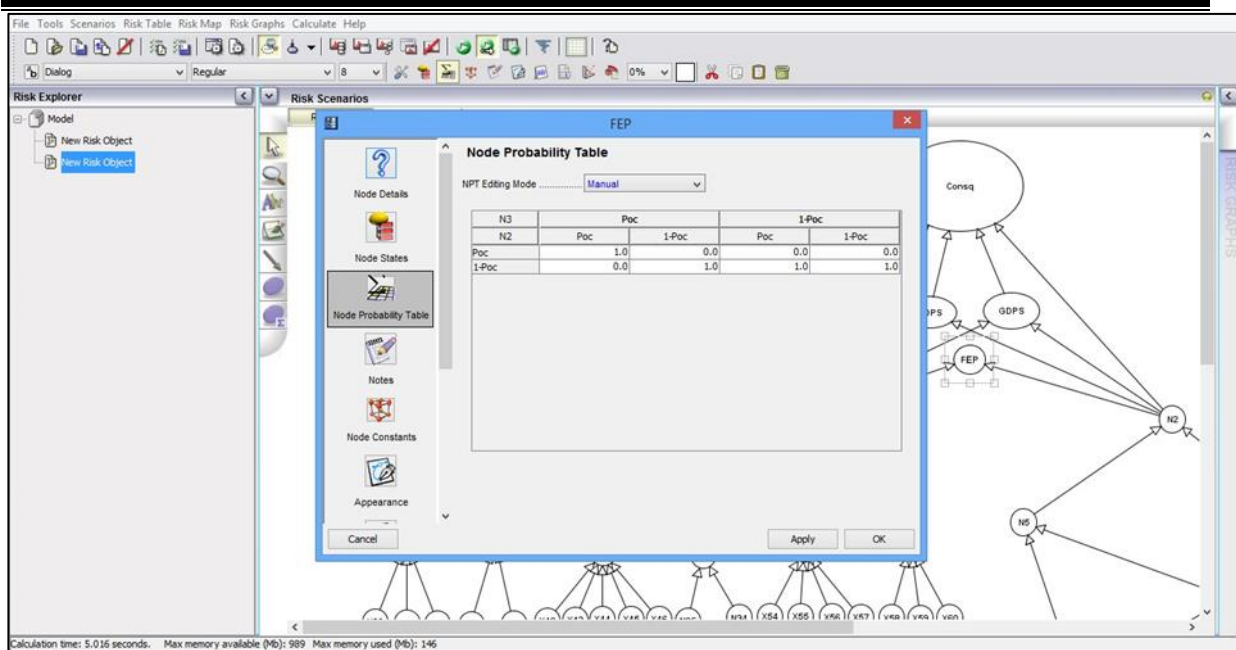


Figure 51 : Tables de probabilités conditionnelles du feu et explosion de pipeline

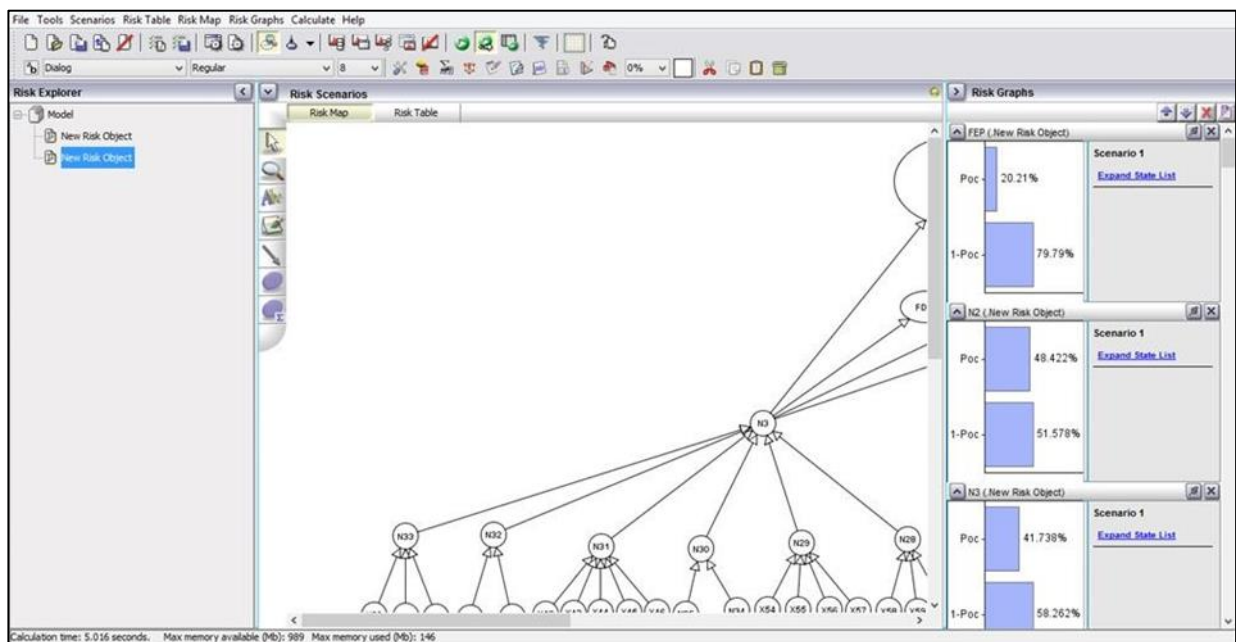


Figure 52 : probabilité d'occurrence du feu et explosion de pipeline, N2 et N3

III.4 Résultats et discussion

Les calculs ont été faits par logiciel Agena risque et la logique floue. Les résultats montrent que :

1. La valeur de probabilité d'occurrence de FEP 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 53 ;

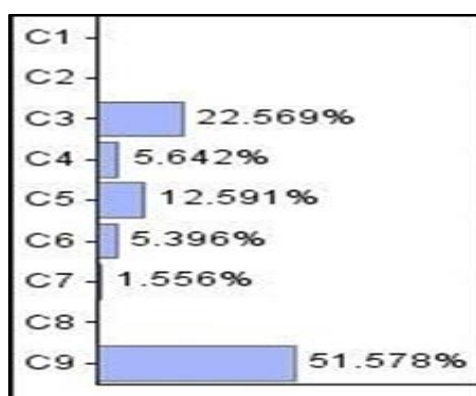


Figure 53 : probabilité d'occurrence des conséquences de feu et explosion de pipeline grâce aux résultats obtenus

Les probabilités d'occurrence des conséquences sont présentées au tableau :

Tableau 10 : Les probabilités d'occurrence des conséquences sont présentées au tableau

Les conséquences	Le pourcentage De La probabilité	Discussion et maintenance
C1	0,00 %	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
C2	0,00 %	
C3	22,569%	
C4	5,642 %	
C5	12,591%	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.
C6	5,396 %	
C7	1,556 %	
C8	0,00 %	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.
C9	51,578%	L'état de sécurité est élevé, donc la première chose sur laquelle nous nous concentrons est l'état de sécurité pour réduire autant que possible l'accident.

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. 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 générale

Le modèle développé dans ce mémoire fournit une image complète des risques liés aux pipelines, la probabilité d'occurrence est calculée à l'aide d'un modèle bayésien de prédiction quantitatif basé sur l'arbre de défaillance 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 d'explosion des pipelines par conséquent en utilisant la théorie des probabilités conditionnelles et en pratique il souvent difficile d'obtenir des valeurs précises de probabilités des événements de base en vue les estimer, il est possible de faire appel à :

- Des bases de données
- Des jugements d'experts
- Des essais lorsque cela est possible
- Au retour d'expérience sur installation ou des installation analogues.

Le RB est capable d'effectuer la même analyse que l'ADD. En particulier, on a vu comment Un ADD peut-être convertit dans un RB et comment cette technique peut fournir les mêmes informations que la probabilité de défaillance du système.

Pour réduire la probabilité d'occurrence de l'explosion d'un pipe, il faut prendre des mesures préventives sur les installations. Vis-à-vis aux événements les plus critiques que nous avons trouvés par le modèle développer dans ce projet, on propose :

- ✓ **1.. La** vigilance des opérateurs doit être augmentée par une bonne formation pour réduire la probabilité d'erreur humaine afin d'éviter les accidents.
- ✓ **2.** des exigences d'inspections/contrôles périodiques qui permettent de vérifier le bon état des pipelines, Ces inspections/contrôles périodiques doivent faire l'objet d'un plan de suivi.
- ✓ **3.** 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.
- ✓ **4.** prise en compte de la mise en place de la maintenance permanente des installations des pipelines.

Conclusion générale

- ✓ 5. donner l'importance des moyens de prévention au travailleur, notamment lors de la maintenance.
- ✓ 6. Sensibilisation continue pour les travailleurs à risque d'explosion des pipelines.
- ✓ 7. Fournir tous les moyens de prévention pour se tenir devant ce type d'accidents.
- ✓ 8. À l'avenir, misez sur des méthodes de prévention intelligentes.
- ✓ 9. Développer un système de protection tel que des drones et des capteurs.

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

- ✓ L'outil développé oblige toujours l'analyste à faire entrer les probabilités des événements basiques pour chaque type de scénario.
- ✓ Inconvénient de la méthode est qu'elle ne prend pas en compte la dynamique du réseau. Autrement dit : Certains scénarios ne peuvent pas être étudiés car ils ne sont pas observables en régime permanent. Cela peut être amélioré en introduisant des lectures de capteur qui mesurent le débit d'hydrocarbure à travers les vannes, plutôt que simplement « Flow » ou « No Flow ».

Finalement, nous espérons que cette étude ouvre la voie à un ensemble de sujets qui Devraient servir à l'avancement des connaissances dans le domaine d'évaluation des risques Dans le domaine des hydrocarbures, et que la recherche profitera aux spécialistes de ce domaine et intéresser les étudiants et les chercheurs.

Bibliographie :

- [1] ABD ELKANI MEFTAH ; BENSAAD DJAMEL ; « Recherche sur la maîtrise de la technique d'élaboration des pipes pour le transport du pétrole ou du gaz naturel » ; Génie Mécanique ; Université de Mohamed Boudiaf ; M'SILA ; 2020/2021.
- [2] ABDELLAOUI Wassila ; BERRICHI Asma ; « Optimisation du transport des carburants dans le pipeline multiproduit ASR/ NAFTAL par l'approche MILP » ; Génie Industriel ; Université Abou bekr Belkaïd ; Tlemcen ; 2015/2016.
- [3] TASINKOU NEGOUE GAEL BRICE ; « LE TRANSPORT ET STOCKAGE DES HYDROCARBURES » ; PETROCHIMIE ; UNIVERSITE D'ANTANANARIVO ; 2015/2016.
- [4] Wikipédia : Pipeline ; Consulté en 29/09/2022 sur <<<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pipeline>>>.
- [5] ZIANI Salah Eddine ; DRICHI Redouane ; « Optimisation du transport de l'hydrocarbure par Canalisation » ; Département des Mathématiques ; Université Saad Dahleb ; Blida ; 2019/2020.
- [6] ABDELLAOUI Wassila ; BERRICHI Asma ; « Optimisation du transport des carburants dans le pipeline multiproduit ASR/ NAFTAL par l'approche MILP » ; Génie Industriel ; Université Abou bekr Belkaïd ; Tlemcen ; 2015/2016.
- [7] Fetrapci : « Le transport par canalisations : le mode de transport le plus durable » ; consulté en 29/09/2022 sur <<http://www.fetrapci.be/Fetrapci/Media/Default/website/documents/fr/home/publications/Memorandum%20Fetrapci-Essenscia%202007_FR.pdf>>
- [8] ABD ELKANI MEFTAH ; BENSAAD DJAMEL ; « Recherche sur la maîtrise de la technique d'élaboration des pipes pour le transport du pétrole ou du gaz naturel » ; Génie Mécanique ; Université de Mohamed Boudiaf ; M'SILA ; 2020/2021.
- [9] ABDELLAOUI Wassila ; BERRICHI Asma ; « Optimisation du transport des carburants dans le pipeline multiproduit ASR/ NAFTAL par l'approche MILP » ; Génie Industriel ; Université Abou bekr Belkaïd ; Tlemcen ; 2015/2016.

Bibliographie

- [10] Encyclopédie Energie : Pipeline ; consulté en 29/09/2022 sur <<[>>](https://energyeducation.ca/Encyclopedie_Energie/index.php/Pipeline#:~:text=Dans%20le%20secteur%20de%20l,d%27autres%20processus%20de%20production.>>>></p><p>[11] Sonatrach : DESCRIPTION DU RESEAU DE TRANSPORT PAR CANALISATION DES HYDROCARBURES & TARIFS DE TRANSPORT ; consulté en 29/09/2022 sur <<>
- [12] Flanagan, R., & Norman, G. (1993). Risk Management and Construction. Blackwell Science Ltd.
- [13] Larousse. (2006). Larousse Définitions.
- [14] Larousse. (2005). Larousse Expression.
- [15] [HMSO 95]. A guide to Risk Assessment and Risk Management for Environmental Protection. England : Her Majesty's Stationery Office. (1995).
- [16] [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).
- [17] GT Méthodologie. (2003). Principes généraux pour l'élaboration et la lecture des études de dangers. INERIS.
- [18] [BSI OHSAS 18001]. Occupational Health and Safety Management Systems – Specification. England. (2005).
- [19] [NF EN 61508]. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques et électroniques programmables relatifs à la sécurité. Paris: AFNOR. (1998).
- [20] ISO 14971. (2007). Medical Device Risk Management. ISO.

Bibliographie

- [21] [ISO/CEI Guide 73, 2002]. Management du risque – Vocabulaire – principes directeurs pour l'utilisation dans les normes. ISO/CEI. (2002).
- [22] NF EN 50129. (Mai 2003). Applications ferroviaires : Systèmes de signalisation, de télécommunication et de traitement, Systèmes électroniques de sécurité pour la signalisation. Paris : AFNOR.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] BEN BOULLAH Mabrouka; NOUAD Salma; « Etude De L'opération De Ramonage Du Gazoduc 12 Sbaa-Adrar »; Génie Chimique; Université Ahmed Draïa Adrar; adrar; 2021.
- [26] BENCHEIKH Mohammed Ezine ; ANTEUR Fella ; « Etude des Risques et Dangers Du tronçon de Gazoduc GR4 (SC-CNDG) avec estimation de la probabilité d'occurrence des défaillances de la ligne par fiabilité structurale » ; UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES ; BOUMERDES ; 2021.
- [27] Larbaoui Abdelmalek ; Haouach Habib ; « Mise en œuvre d'un system information Géographique pour la gestion du transport de l'hydrocarbure par canalisation » ; Informatique ; UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS ; MOSTAGANEM ; 2012/2013.
- [28] GUELLAL Z'hor ; GACI Yacine ; « Optimisation du transport de gaz naturel par le gazoduc GZ1 Hassi R'mel-Arzew TRC-SONATRACH » ; Recherche Opérationnelle et Mathématique de gestion (ROMAG) ; Université M'hamed Bougara ; Boumerdes ; 2015/2016.
- [29] Les services de l'État dans le Doubs ; « LE RISQUE LIE AU TRANSPORT PAR CANALISATION » ; consulté en date 04-10-2022 sur <<<https://www.doubs.gouv.fr/content/download/31173/196489/file/Le%20risque%20lié%20au%20transport%20de%20canalisation.pdf>>>.
- [30] Aria barpi : « Rupture et inflammation d'un gazoduc Le 30 juillet 2004 Ghislenghien

Bibliographie

Belgique » ; consulté en 29/09/2022 sur <<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/A27681_ips27681_001.pdf>>

[31] Aria barpi : « Ruptures multiples sur un gazoduc » ; consulté en 29/09/2022 sur <<<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/46969/>>>

[32] BEN AMOR Houssam Eddine ; DEGHOUM Chikch ; DEGHOUM Nacer Addine ; MESSAI Ahmed Amjed ; « Etude de fonctionnement d'un oléoduc avec différents régimes » ; Energétique ; Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued ; El-Oued ;2022.

[33] ZIANI Salah Eddine ; DRICHI Redouane ; « Optimisation du transport de l'hydrocarbure par Canalisation » ; Département des Mathématiques ; Université Saad Dahleb ; Blida ; 2019/2020.

[34] ABD ELKANI MEFTAH ; BENSaad DJAMEL ; « Recherche sur la maîtrise de la technique d'élaboration des pipes pour le transport du pétrole ou du gaz naturel » ; Génie Mécanique ; Université de Mohamed Boudiaf ; M'SILA ; 2020/2021.

[35] ABD ELKANI MEFTAH ; BENSaad DJAMEL ; « Recherche sur la maîtrise de la technique d'élaboration des pipes pour le transport du pétrole ou du gaz naturel » ; Génie Mécanique ; Université de Mohamed Boudiaf ; M'SILA ; 2020/2021.

[36] Aria barpi : « Dommages sur un site pétrochimique et rupture de pipelines à la suite d'une inondation » ; consulté en 04/10/2022 sur <<<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/8990/>>>.

[37] Aria barpi : « Explosions suivies d'un incendie dans un terminal pétrolier » ; consulté en 04/10/2022 sur <<<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/28224/>>>.

[38] ABD ELKANI MEFTAH ; BENSaad DJAMEL ; « Recherche sur la maîtrise de la technique d'élaboration des pipes pour le transport du pétrole ou du gaz naturel » ; Génie Mécanique ; Université de Mohamed Boudiaf ; M'SILA ; 2020/2021.

[39] ERICSON C. 1999. "Fault Tree Analysis – A History." Proceedings of the 17th International System Safety Conference 1999.

[40] VESELY W.E., STAMATELATOS M., DUGAN J.B., FRAGOLA J., MINARICK J., RAILSBACK J., 2002. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. NASA Office of

Bibliographie

Safety and Mission Assurance.

[41] 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.

[42] ISOGRAPH SOFTWARE, 2002. Fault Tree+ v10.1. Software tool (<http://www.isographsoftware.com>)

[43] VILLEMEUR A. 1992. Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment: Volume 1. Chichester, UK. John Wiley & Sons.

[44] C.R. Sundararajan (1991). Guide to Reliability Engineering. Data Analysis, Applications, Implementation, and Management, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 239–240.

[45] 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

[46] 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.

[47] 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.

[48] Palshikar G.K. 2001. "Temporal Fault Trees." Information and Software Technology #44 (2002), pages 137-150.

[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.

Bibliographie

- [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.
- Batchelor C, Cain J (1999) Application of belief networks to water management studies. *Agr Water Manage* 40 (1):51-57.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] Schubert M, Hoj NP, Ragnoy A, Buvik H (2012) Risk Assessment of Road Tunnels using Bayesian Networks. *Transp Res Arena* 2012 48:2697-2706.
- [69] 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.
- [70] 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*

Bibliographie

Safety 134 (0):157-168.

[71] Modarres, M., Kaminskiy, M., Krivtsov, V., 1999. Reliability engineering and risk analysis. Marcel Dekker, New York.

[72] Øien, K., 2001. A framework for the establishment of organizational risk indicators. Reliability Engineering and System Safety 74, 147–168.

[73] 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.

[74] 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.

Cornalba, C., Giudici, P., 2004. Statistical models for operational risk management. Physica A 338, 166–172.

[75] Bayraktarli, Y. Y. (2009). Construction and application of Bayesian probabilistic networks for earthquake risk management (Doctoral dissertation, University of Karlsruhe).

[76] 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.

[77] 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.

[78] 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.

[79] 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.

[80] 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.

[81] Duijm, N.J., 2009. Safety-barrier diagrams as a safety management tool. Reliability Engineering and System Safety 94 (2), 332–341.

[82] 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.

[83] 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.

[84] Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2013). Quantitative risk analysis of offshore drilling

Bibliographie

operations: A Bayesian approach. *Safety science*, 57, 108-117.

[85] 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.

[86] Chateauneuf, 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.

[87] 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.

[88] Korb KB, Nicholson AE (2004) *Bayesian Artificial Intelligence*. CRC Press, London.

[89] (Mariapia LAMPIS) ; Application of Bayesian Belief Networks to System Fault Diagnostics ; A Doctoral Thesis Submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of the Doctor of Philosophy of Loughborough University ; April 2010.

[90] Kanury, A. M. (1981). "Limiting case fires arising from fuel tank/pipeline ruptures." *Fire Safety Journal* 3(4): 215-226.

[91] 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.

[92] 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.

[93] Alvares, N. J. and H. K. Hasegawa (1980). "Fire hazard analysis for fusion energy experiments." *Fire Safety Journal* 2(3): 191-211.

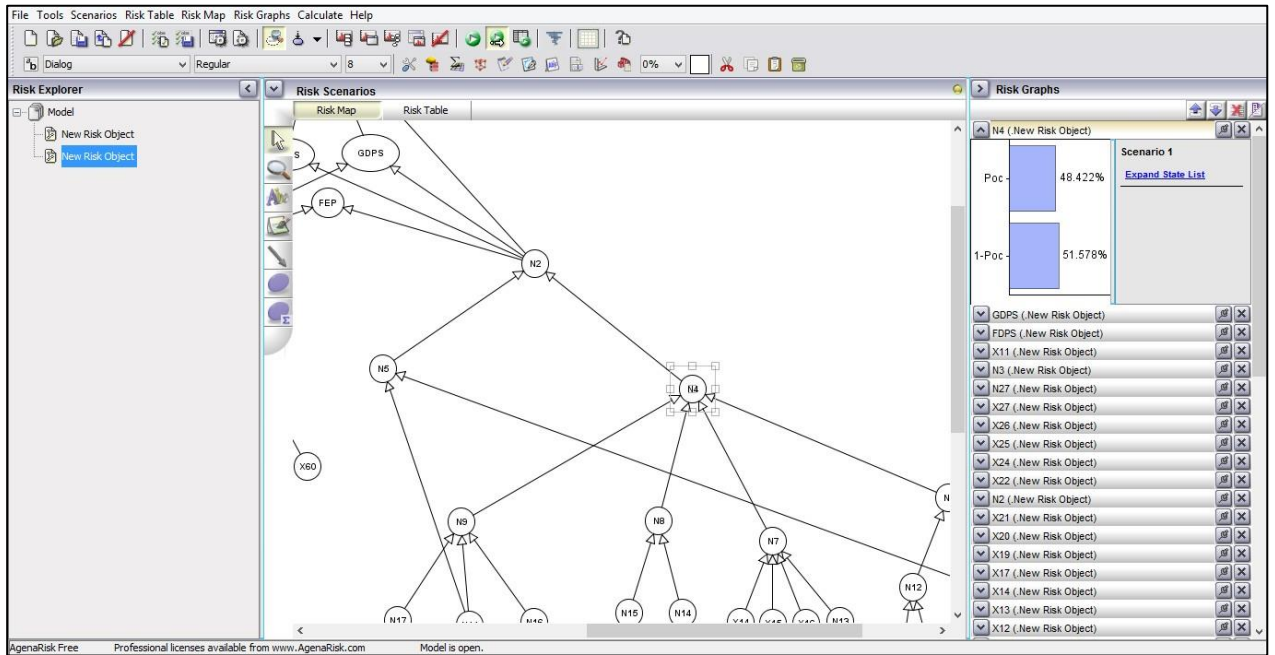
[94] Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Information and control* 8(3): 338-353.

[95] Tyagi, S. K., Panday, D., Tyagi, R., 2010. Fuzzy set theoretic approach to fault

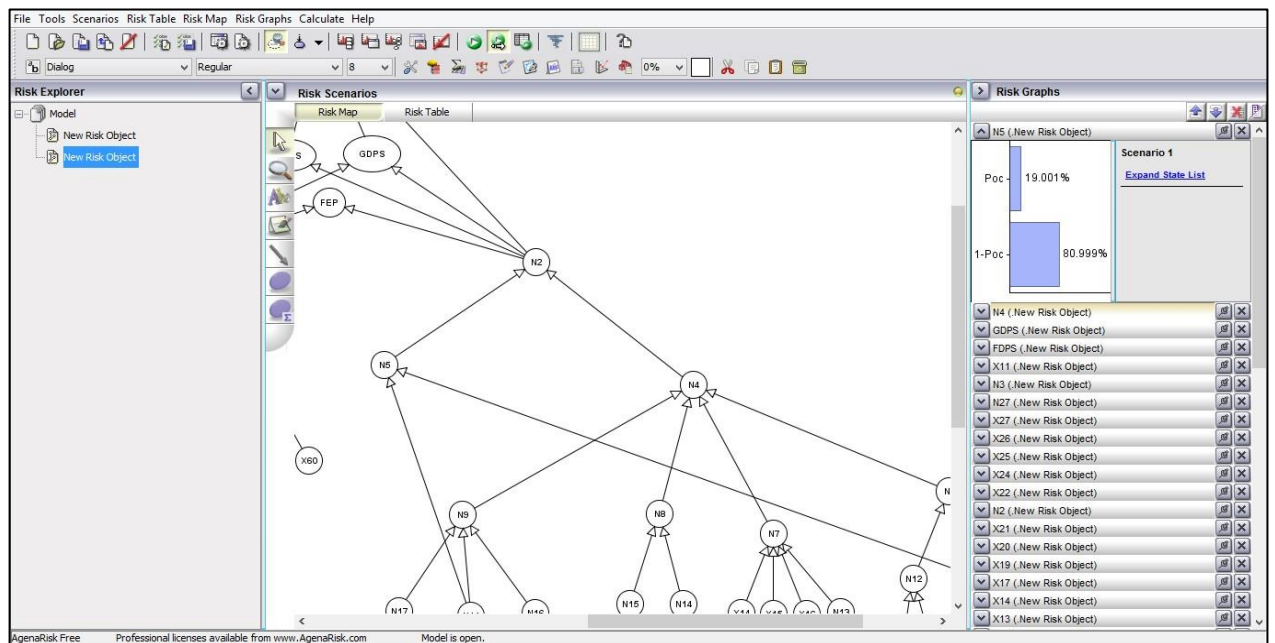
[96] Onisawa, T., 1988. An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. *Fuzzy Sets and Systems* 27(2): 87-103.

[97] Agena-Risk Software Version 6.1, 2014. <http://www.agenarisk.com>.

Annexe



Annexe 1 : Probabilité d'occurrence de la rupture (N4) sur le logiciel Agena-Risk



Annexe 2 : Probabilité d'occurrence de la rupture (N4) sur le logiciel Agena-Risk