



République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université 20 août 1955 – Skikda
Faculté de technologie
Département de pétrochimie et génie des procédés

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم البتروكيمياة وهندسة الطرائق

Laboratoire de Recherche en Génie Chimique et Environnement de Skikda
« LGCES »

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme

Doctorat 3^{ème} Cycle - LMD

En

Hygiène et Sécurité Industrielle

Option : Sécurité Industrielle et environnement, maîtrise des risques

Par

BENHAMLAOUI Wafia

**Evaluation des risques liés aux transports de matières
dangereuses dans la wilaya de Skikda**

Soutenue le 16/12/2021. Devant le jury composé de :

ZENNIR Youcef	Prof.	Université de Skikda	Président
ROUAINIA Mounira	Prof.	Université de Skikda	Rapporteuse
ZIGHED Lilia	Prof.	Université de Skikda	Examinatrice
SAADI Saadia	MCA	Université de Batna 2	Examinatrice
OUAZRAOUI Nouara	MCA	Université de Batna 2	Examinatrice
MEDJRAM Mohamed Salah	Prof.	Université de Skikda	Invité

2020 - 2021

Remerciements

C'est à travers ces quelques lignes que j'exprime une profonde gratitude envers toutes celles et ceux sans qui cette thèse n'aurait pas pris forme.

Je tiens à remercier plus particulièrement mon encadreure, la Professeure Mounira ROUAINIA, c'est grâce à ses précieux conseils et orientations pendant ces années de recherches, le temps et l'énergie qu'elle m'a consacrée que j'ai pu terminer ce travail.

Je n'oublie pas de remercier également le directeur du laboratoire LGCES - Skikda, le Professeur Mohamed Salah MEDJRAM, de m'avoir donné la chance d'effectuer mes travaux de recherches au sein de ce laboratoire, et aussi pour ses encouragements sans fin.

Ma gratitude se dirige aussi vers l'ensemble des membres de jury : Mr. Youcer ZENNIR, Mme. Lilia ZIGHED (Professeurs à l'université de Skikda), Mme. Saadia SAADI et Mme. Nouara OUAZRAOUI (Maîtres de conférence A à l'Institut d'Hygiène et Sécurité industrielle - Batna), pour avoir accepté d'évaluer ce travail et en prenant part au jury de soutenance de cette thèse.

Mes remerciements vont également à tout le personnel où j'ai effectué mes stages pratiques, spécialement Mr. Sabti ALI NARA (ex-chef service prévention- RTE Skikda), Mr Mohamed SAYOUD (chef département Sécurité Industrielle - RA2K), Mr. Idriss BOUHADJA (chef d'unité Canalisations NAFTAL - Skikda) et Dr. Karima Sassi (médecin- Lindegas Skikda).

Je remercie aussi ma chère amie Dr. BOOUDERBALA Soumia, l'ensemble de mes amis proches et mes collègues de l'université de Skikda.

Je ne peux clore ces remerciements sans en adresser les plus sincères à ma chère mère pour sa présence, sa patience, ses encouragements et son appui constant.

Résumé

Le transport de matières dangereuses peut avoir plusieurs répercussions, telles que des accidents liés aux passages de camions ou de canalisations dans une zone urbaine, fuites sur des canalisations dues à des activités externes ou tout simplement des défaillances internes liés à cette canalisation... etc. Ces conséquences peuvent affecter la sécurité des personnes, des installations et avoir des répercussions sur l'environnement.

L'objectif de cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'évaluation et l'analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans la région de Skikda. Cette analyse est appliquée au sein de la zone pétrochimique de Skikda, qui regroupe plusieurs entreprises dont l'activité principale est le transport de matières dangereuses à travers toute la wilaya de Skikda. Notre travail est basé sur l'association de méthodes d'analyse des risques et outils numériques de modélisations, afin de permettre l'identification des dangers et phénomènes dangereux liés aux transports de matières dangereuses. En premier lieu, nous allons procéder à un recensement des entreprises ayant des activités de transport de matières dangereuses, lister ces matières dangereuses, établir une classification en fonction de leur mode de transport et leurs caractéristiques physico-chimiques. En deuxième partie, nous avons aussi procédé à une étude qualitative, en utilisant une analyse préliminaire des risques combinée avec la méthode nœud papillon, pour identifier les causes, les conséquences ainsi que les phénomènes dangereux liés au transport par canalisation de certaines matières dangereuses transportées dans la région de Skikda. Pour finir, nous avons modélisé les phénomènes dangereux, identifiés précédemment, afin de déterminer les étendues de leurs effets thermiques et effets de surpressions sur les installations avoisinantes.

Mots clés : Transport de Matières Dangereuses, Analyse des risques, Nœud Papillon, STPA, Transport par Canalisation.

Abstract

The transport of hazardous materials may have several consequences, such as accidents linked to the passage of trucks or pipes in an urban area, leaks on pipelines due to external activities or quite simply internal failures linked to this pipelines, etc. These consequences can affect the safety of people and installations and have repercussions on the environment.

The objective of this thesis falls within the framework of the assessment and analysis of the risks associated with the transport of hazardous materials in the Skikda region. This analysis is applied within the petrochemical zone of Skikda, which brings together several companies whose main activity is the transport of hazardous materials throughout the entire Wilaya of Skikda. Our work is based on the combination of risk analysis methods and digital modeling tools, in order to identify the hazards and dangerous phenomena associated with the transport of hazardous materials. First, we are going to proceed to a census of companies carrying out hazardous materials transport activities, list these hazardous materials, establish a classification according to their mode of transport and their physicochemical characteristics. In the second part, we also carried out a qualitative study, using a preliminary risk analysis combined with the bowtie method, to identify the causes, the consequences as well as the dangerous phenomena linked to the transport by pipeline of certain dangerous materials transported in the Skikda region. Finally, we have modeled the dangerous phenomena, identified previously, in order to determine their severity, the damage they can present and their extent.

Keywords: Transport of Hazardous Materials, Risk Analysis, BowTie, STPA, Pipeline Transportation.

ملخص

يمكن أن يكون لنقل المواد الخطرة عدة عواقب، مثل الحوادث المرتبطة بمرور الشاحنات أو الأنابيب في منطقة حضرية، أو التسريبات على الأنابيب بسبب الأنشطة الخارجية أو ببساطة الأعطال الداخلية المرتبطة بهذا الأنبوب ، إلخ. يمكن أن تؤثر هذه العواقب على سلامة الناس والمنشآت ولها تداعيات على البيئة.

الهدف من هذه الأطروحة يندرج في إطار تقييم وتحليل المخاطر المرتبطة بنقل المواد الخطرة في منطقة سكيكدة. يتم تطبيق هذا التحليل داخل المجمع البتروكيميائي في سكيكدة، والذي يضم العديد من الشركات التي يتمثل نشاطها الرئيسي في نقل المواد الخطرة في جميع أنحاء ولاية سكيكدة. يعتمد عملنا على مزيج من طرق تحليل المخاطر وأدوات النمذجة الرقمية، من أجل تحديد الأخطار والظواهر الخطيرة المرتبطة بنقل المواد الخطرة. أولاً، سنقوم بإجراء إحصاء للشركات التي تقوم بأنشطة نقل المواد الخطرة، وإنشاء تصنيف وفقاً لطريقة نقلها وخصائصها الفيزيائية والكيميائية. في الجزء الثاني، أجرينا أيضاً دراسة نوعية، باستخدام تحليل أولي للمخاطر جنباً إلى جنب مع طريقة Nœud Papillon، لتحديد الأسباب، النتائج والظواهر الخطيرة المرتبطة بالنقل عن طريق خطوط الأنابيب لبعض المواد الخطرة المنقولة في منطقة سكيكدة. أخيراً، قمنا بنمذجة المخاطر، التي تم تحديدها مسبقاً، لتحديد شدتها، والأضرار التي يمكن أن تسببها ومدى انتشارها.

الكلمات المفتاحية: نقل المواد الخطرة، تحليل المخاطر، Nœud Papillon ، STPA، النقل عبر خطوط الأنابيب.

Liste des abréviations

ADC	Arbre De Cause
ADD	Arbre De Défaillance
AND	Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voie de navigation intérieure
ADR	Accord Européen Relatif Au Transport International De Marchandises Dangereuses Par Route
AMDE	Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets de leurs Criticité
APR	Analyse Préliminaire des Risques
BLEVE	Boiling Liquide Expanding Vapour Explosion
CEE-ONU	Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
CFR	Code Des Règlements Fédéraux Des États-Unis
COTIF	Convention relative aux transports internationaux ferroviaires
ETA	Event Tree Analysis (Arbre des Evènement)
FMEA	Failure Modes, and Effects Analysis
FMECA	Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
HAZOP	Hazard and Operability Study
ISO	International Organization for Standardization
LIE	Limite Inférieure d'Explosivité
LII	Limite Inférieure d'Inflammabilité
LSI	Limite Supérieure d'Inflammabilité
OHSAS	Standard Occupational Health and Safety Assessment Series
PHAST	Process Hazard Analysis SofTware
QRA	Quantitative Risk Assessment
Ra1k	Complexe de raffinage –Skikda
Ra2k	Complexe de raffinage du condensat –Skikda
RID	Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses
RTE	Terminal Arrivée Région Transport Est –Skikda
TMD	Trasnports de matières dangereuses
STPA	System-Theoretic Process Analysis
VCE	Vapour Cloud Explosion

Liste des figures

CHAPITRE I : Etat de l'art sur les risques liés aux transports de matières dangereuses

Figure I.1. Dimensions du risque	05
Figure I.2. Pictogramme des différentes classes des matières dangereuses	08
Figure I.3. Pictogramme de la réglementation CLP	09

CHAPITRE II : Approches et méthodes d'analyse des risques dans le secteur du transport de matières dangereuses

Figure II.1. Étapes de la méthode QRA	30
Figure II.2. Différents modèle de l'approche par vulnérabilité	32
Figure II.3. Méthodes appliquées	33
Figure II.4. Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon	34
Figure II.5. Le diagramme des étapes de la STPA	35

CHAPITRE III : Analyse des risques dans le secteur du transport de matières dangereuses

Figure III 1. Cartographie des accidents liés au transport de matières dangereuse par voie ferroviaire dans la région de Skikda	47
Figure III.2. Nombres d'accidents survenus par année sur la période [2003-2017]	48
Figure III.3. Types de conséquences liés aux accidents survenus dans la région de Skikda	48
Figure III.4. Réseau de transport des hydrocarbures dans la région de Skikda	51
Figure III.5. Description du système de transport par canalisation de condensat	51
Figure III.6. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Brut	53
Figure III.7 Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Gaz Naturel	54
Figure III.8. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Condensat	55
Figure III.9. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Naphta	56
Figure III.10. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Kérosène	57
Figure III.11. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Gasoil (lourd/léger)	58
Figure III.12. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Butane	59
Figure III.13. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation de l'essence	60
Figure III.14. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Gasoil	61
Figure III.15. Structure de contrôle au niveau du terminal d'arrivé	64

CHAPITRE IV : Modélisation des phénomènes dangereux liés aux TMD par canalisation

Figure IV.1. Schéma de la dispersion gaussienne	76
Figure IV.2. Représentation schématique de la propagation des flammes dans un nuage explosible formé en champ libre et initialement quasi au repos	78
Figure IV.3. Longueur de flamme en fonction de la puissance du feu	80
Figure IV.4. Étendue du nuage de dispersion du gaz naturel	89
Figure IV.5. Vue latérale du nuage de dispersion du gaz naturel	89
Figure IV.6. Distance et Intensité des radiations pour feu de torche du gaz naturel	90
Figure IV.7. Enveloppe de flash fire du gaz naturel	91
Figure IV.8. Étendue du nuage de dispersion du condensat	93
Figure IV.9. Vue latérale du nuage de dispersion du condensat	93
Figure IV.10. Distance et Intensité des radiations pour feu de torche du condensat	94
Figure IV.11. Enveloppe du flash fire du condensat	95
Figure IV.12. Étendue du nuage de dispersion du butane	97
Figure IV.13. Vue latérale du nuage de dispersion du butane	98
Figure IV.14. Distance et Intensité des radiations pour feu de torche du butane	99
Figure IV.15. Enveloppe du flash fire du butane	100

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Etat de l'art sur les risques liés aux transports de matières dangereuses

Tableau.I.1. Exemple d'échelles de la gravité (Entreprise-SONATRACH)	05
Tableau.I.2. Exemple d'échelles de la probabilité (Entreprise-SONATRACH)	06
Tableau.I.3. décrets exécutifs et arrêtés interministériels régissant la gestion du TMD en Algérie	10
Tableau.I.4. Causes possibles d'accidents ferroviaires liés au transport de matières dangereuses	15
Tableau I.5. Quelques accidents liés au transport de matières dangereuses	17

CHAPITRE II : Approches et méthodes d'analyse des risques dans le secteur du transport de matières dangereuses

Tableau.II.1. classification de quelques méthodes d'analyses des risques	25
Tableau.II.2. Exemple de tableau type « APR »	27
Tableau.II.3. Exemple de tableau type « AMDEC »	28
Tableau.II.4. Exemple de tableau type « HAZOP »	29
Tableau.II.5. Méthodes d'analyse des risques pouvant être utilisées dans la méthode QRA	31

CHAPITRE III : Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans la région de Skikda

Tableau III.1. Activités de transport de matières dangereuses dans la région de Skikda	39
Tableau III.2. Classification des matières dangereuses transportées dans la région de Skikda	41
Tableau III.3. Historique des accidents liés aux transports de matières dangereuses par voie ferroviaires dans la région de Skikda sur la période 2003-2017	44
Tableau III.4. Présentation de quelques caractéristiques des canalisations de transport de gasoil et essence	50
Tableau III.5. Analyse préliminaire des risques liés au transport par canalisation	52
Tableau III.6. Actions de contrôle non sécurisées	65
Tableau III.7. Identifications des contraintes du contrôle	67
Tableau III.8. Scénarios identifiés	68
Tableau III.9. Causes identifiés par les deux méthodes	71
Tableau III.10. Classification de causes identifiées	72
Tableau III.11. Comparaison de la méthodologie de chaque méthode	73

CHAPITRE IV : Modélisation des phénomènes dangereux liés aux TMD par canalisation

Tableau IV.1. Effets thermiques sur les bâtiments et l'usine aux niveaux des conséquences spécifiés	85
Tableau IV.2. Effets de surpressions sur les bâtiments et l'usine aux niveaux des conséquences spécifiés	86
Tableau IV.3. caractéristiques des canalisations de TMD dans la région de Skikda	87
Tableau IV.4. Classes météorologiques	88

Tableau IV.5. Paramètres du scénario étudié (Gaz naturel)	88
Tableau IV.6. La dispersion atmosphérique du gaz naturel en fonction des classes météorologiques	89
Tableau IV.7. Hauteur de la flamme du Feu de torche du gaz naturel	90
Tableau IV.8. Résultats relatifs au flash fire du gaz naturel, Distance sous le vent jusqu'aux concentrations définies	91
Tableau IV.9. Résultats des effets de surpressions du VCE liés à la fuite du gaz naturel	92
Tableau IV.10. Paramètres du scénario étudié (condensat)	92
Tableau IV.11. La dispersion atmosphérique du condensat en fonction des classes météorologiques	93
Tableau IV.12. Hauteur de la flamme du condensat	94
Tableau IV.13. Résultats relatifs au flash fire du condensat, Distance sous le vent jusqu'aux concentrations définies	95
Tableau IV.14. Caractéristiques de l'early pool fire du condensat	96
Tableau IV.15. Caractéristiques du late pool fire du condensat	96
Tableau IV.16. Résultats des effets de surpressions du VCE liés à la dispersion de condensat	96
Tableau IV.17. Paramètres du scénario étudié (butane)	97
Tableau IV.18. La dispersion atmosphérique du butane en fonction des classes météorologiques	98
Tableau IV.19. Hauteur de la flamme du butane	99
Tableau IV.20. Résultats relatifs au flash fire du butane, Distance sous le vent jusqu'aux concentrations définies	100
Tableau IV.21. Résultats des effets de surpressions du VCE liés à la dispersion du butane	101

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
ملخص	iv
Liste des abréviations	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Table des matières	x
Introduction générale	01
Chapitre I : Etat de l'art les risques liés aux transports de matières dangereuses	
<i>Introduction</i>	03
I.1. Généralités sur le risque	03
I.1.1. Danger	03
I.1.2. Dommage	03
I.1.3. Evènement indésirable	03
I.1.4. Evènement dangereux	04
I.1.5. Situation dangereuse	04
I.1.6. Phénomène dangereux	04
I.1.7. Risque	04
I.1.8. Principales dimensions du risque	05
I.2. Généralités sur les matières dangereuses et leurs modes de transport	06
I.2.1. Matières dangereuse	06
I.2.1.1 Définition	06
I.2.1.2. Classification	06
I.2.1.3. Mode de transport	09
I.2.2. Cadre législatif entourant le transport de matières dangereuses	10
I.2.2.1. Règlementation Algérienne	10
I.2.2.2. Règlementation Européenne	11
I.2.2.3. Règlementation Américaine	11
I.2.2.4. Règlementation Canadienne	11
I.3. Les risques liés au transport de matières dangereuses	12
I.3.1. Risques liés aux transports de matières dangereuses par route	13
I.3.2. Risques liés aux transports de matières dangereuses par canalisation	13
I.3.2.1. La corrosion	13
I.3.2.2. Risques liés à la pression	14
I.3.2.3. Risque de surpression	14
I.3.2.4. L'éclatement	14
I.3.3. Risques liés aux transports de matières dangereuses par voie ferroviaire	15
I.3.4. Risques liés aux transports de matières dangereuses par voie Maritime	16
I.4. Gestion des risques liés au transport de matières dangereuses	16
I.5. Causes possibles d'un accident lié au transport de matières dangereuses	19
<i>Conclusion</i>	19
<i>Références bibliographiques</i>	20

Chapitre II : Approches et méthodes d'analyse des risques dans le secteur du transport de matières dangereuses

<i>Introduction</i>	22
II.1. Etat de l'art	22
II.2. Méthodes d'analyses et d'évaluation des risques	24
II.2.1. Classification	24
II.2.1.1. Approche probabiliste	25
II.2.1.2. Approche déterministe	26
II.2.1.3. Démarche inductive	26
II.2.1.4. Démarche déductive	26
II.2.1.5. Méthodes quantitatives	26
II.2.1.6. Méthodes qualitatives	26
II.2.2. Exemples de méthodes d'analyse	27
II.2.2.1. Analyse préliminaire des risques (APR)	27
II.2.2.2. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) et Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)	28
II.2.2.3. HAZard and OPerability (Hazop)	29
II.2.2.4. la méthode « évaluation quantitative des risques » (QRA)	30
II.2.2.5. Évaluation de la vulnérabilité dans les systèmes de transport (Vulnerability Assessment in Transportation Systems)	31
II.3. Description de la méthodologie suivie	33
II.4. Méthodes d'analyse des risques retenus pour l'étude des risques liés aux TMD dans la région de Skikda	33
II.3.1. La méthode Nœud papillon	33
II.3.2. La méthode STPA (System-Theoretic Process Analysis)	34
<i>Conclusion</i>	35
<i>Références bibliographiques</i>	36

Chapitre III : Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans la région de Skikda

<i>Introduction</i>	39
III.1. Le transport de matières dangereuses dans la Région de Skikda	39
III.1.1. Activités de transport de matières dangereuses dans la région de Skikda	39
III.1.2. Classification des matières dangereuses transportées dans la région de Skikda	41
III.1.3. Transport de matières dangereuses par voie Ferroviaire dans la région de Skikda	43
III.1.3.1. Description des chemins de fer sur la région de Skikda	43
III.1.3.2. Historique des accidents liés aux transports de matières dangereuses par voie ferroviaire dans la région de Skikda	44
III.1.4. Transport routier de matières dangereuses dans la région de Skikda	48
III.1.5. Transport de matières dangereuses par canalisation dans la région de Skikda	49
III.1.5.1. Région de transport Est – RTE	49
III.1.5.2. Topping de Condensat Ra2K	49

III.1.5.3. NAFTAL : District carburants de Skikda- Unité canalisations de Skikda	50
III.2. Présentation du cadre de l'étude	50
III.3. Analyse préliminaire des risques liés aux transports de matières dangereuses par canalisations	51
III.4. Analyse des risques par la méthode Nœud Papillon	52
III.4.1. Identification de l'évènement redouté central	52
III.4.2. Résultats obtenus dans l'unité RTE	52
III.4.3. Résultats obtenus dans l'unité Ra2k	58
III.4.4. Résultats obtenus dans l'unité NAFTAL	60
III.4.5. Discussion des résultats obtenus	62
III.5. Application de la méthode STPA	62
III.6. Etude comparative entre l'analyse des risques par la méthode STPA et la méthode Nœud Papillon sur une canalisation	71
III.6.1. Analyse et comparaison des résultats obtenus	71
III.6.2. Classification des dangers identifiés	72
III.6.3. Comparaison des conséquences et scénarios identifiées	72
III.6.4. Comparaison des méthodologies	72
<i>Conclusion</i>	73
Références bibliographiques	74

CHAPITRE IV : Modélisation des phénomènes dangereux liés aux TMD par canalisation dans la région de Skikda

<i>Introduction</i>	75
IV.1. Modélisation mathématique des phénomènes dangereux	75
IV.1.1. Dispersion atmosphérique	75
IV.1.1.1. Modèles gaussiens	75
IV.1.1.2. Modèles intégraux	76
IV.1.1.3. Modèles tridimensionnels CFD	77
IV.1.1.4. Modèle UDM de dispersion du logiciel PHAST	77
IV.1.2. Incendie	77
IV.1.2.1. Feu de nuage	77
IV.1.2.2. feu de torche	79
IV.1.2.3. feu de nappe	81
IV.1.3. Explosion	84
IV.2. Modélisation des phénomènes dangereux liés aux transports de matières dangereuses par canalisation dans la région de Skikda	85
IV.2.1. Détermination des effets thermiques et surpressions	85
IV.2.1.1. Les effets thermiques	85
IV.2.1.2. Les effets de surpressions	86
IV.2.2. Caractéristiques des canalisations étudiées	87
IV.2.3. Détermination des données météorologiques	88
IV.2.4. Modélisation des phénomènes dangereux liés au transport du gaz naturel par canalisation	88
IV.2.4.1. Dispersion atmosphérique du gaz naturel	88
IV.2.4.2. Feu de torche (Jet fire) du gaz naturel	90
IV.2.4.3. Feu de nuage (flash fire) du gaz naturel	90
IV.2.4.4. Explosion type VCE liée à la fuite du gaz naturel	91
IV.2.5. Modélisation des phénomènes dangereux liés au transport du	92

condensat par canalisation	
IV.2.5.1. Dispersion atmosphérique du condensat	92
IV.2.5.2. Feu de torche (Jet fire) du condensat	94
IV.2.5.3. Feu de nuage (flash fire) du condensat	95
IV.2.5.4. Feu de nappe (pool fire) du condensat	95
IV.2.5.5. Explosion type VCE liée à la dispersion de condensat	96
IV.2.6. Modélisation des phénomènes dangereux liés au transport de butane par canalisation	97
IV.2.6.1. Dispersion atmosphérique du butane	97
IV.2.6.2. Feu de torche (Jet fire) du butane	98
IV.2.6.3. Feu de nuage (flash fire) du butane	99
IV.2.6.4. Explosion type VCE liée à la dispersion du butane	100
<i>Conclusion</i>	101
Références bibliographiques	102
Conclusion générale et Perspectives	104

Introduction
Générale

Introduction générale

Le transport est une nécessité après la production de toute matière. Cela est notamment le cas dans le domaine industriel. Ces matières peuvent être sous plusieurs formes, de différentes caractéristiques physico-chimiques, leur transport nécessite ainsi des attentions plus particulières. Il s'agit alors d'un contexte particulier dénommé Transport de Matières Dangereuses (TMD).

Les industriels ainsi que les chercheurs accordent un intérêt croissant pour l'analyse des risques liés au Transport de Matières Dangereuses et des dégâts majeurs qu'ils peuvent engendrer. L'objectif visé consiste à mettre en place des systèmes de gestion du transport de matières dangereuses permettant de réduire les risques ainsi que les impacts d'éventuels accidents liés au TMD sur l'environnement et les populations. Il s'agit alors d'exploiter plusieurs méthodes et même d'en combiner certaines parfois pour analyser et évaluer les risques liés au transport de matières dangereuses.

Les risques liés aux TMD constituent les conséquences d'accidents ayant lieu lors du transport de ces matières. Les itinéraires peuvent changer plusieurs fois allant d'un milieu urbain à un milieu totalement végétal (forêts, vergers, montagnes, tunnels...). Ces risques peuvent être de différentes natures (explosivité, inflammabilité, toxicité, radioactivité, brûlure, gazeux, infectieux, réaction violente spontanée). Ils peuvent ainsi engendrer des conséquences graves pour l'homme et l'environnement.

Dans le cadre de l'évaluation des risques liés au transport de matières dangereuses, différentes méthodes et approches existent et sont développées pour mener à bien une bonne gestion des risques liés au transport de matières dangereuses, allant de l'identification des risques jusqu'à leur maîtrise ou réduction.

Ces méthodes constituent des moyens utiles pour mener des études qualitatives sur le transport de matières dangereuses, qui ont pour principale but d'identifier toutes les matières dangereuses transportées dans une région, les classer et de permettre l'identification des dangers et risques qui leur sont liés, et cela en fonction du mode de transport utilisé.

L'objectif de ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte précédent. Il s'agit de réaliser une évaluation des risques liés au TMD dans la région de Skikda, où son complexe pétrochimique est marqué par une activité de transport de marchandise importante principalement celle des matières dangereuses (tels que les dérivés pétroliers). Outre le fait de

mettre en exergue l'importance d'une évaluation des risques liés au transport de matières dangereuses dans la région de Skikda, il s'agit dans la première partie de notre travail de faire un recensement des entreprises ayant une activité de transport de matières dangereuses, lister ces matières dangereuses, les classifier et identifier le mode de transport utilisé par chaque entreprise. En second lieu, une démarche qualitative basée sur une analyse des risques liés aux Transport de Matières Dangereuses est suivie, et présente comme intérêt majeur de contextualiser l'identification des dangers et risques liés au TMD dans la région de Skikda. Nous procédons également à une modélisation des phénomènes dangereux liés aux transports de certaines matières dangereuses dans la région de Skikda.

Après une introduction générale, notre thèse est organisée en quatre chapitres :

i- Le premier chapitre a pour but d'introduire des notions générales sur le risque, quelques généralités sur les matières dangereuses, ainsi que les différents risques liés à leurs transports en fonction de plusieurs modes de transport , tout en passant par l'aspect règlementaire de la gestion du TMD en Algérie et à l'échelle mondiale.

ii- Le deuxième chapitre aborde les différentes approches de classification des méthodes d'analyse des risques. Ce chapitre présente aussi quelques méthodes d'analyse des risques qu'on peut utiliser dans le secteur du transport de matières dangereuses. La dernière partie de ce chapitre est consacré à la présentation de la méthodologie qui va être suivie pour analyser les risques liés aux TMD dans la région de Skikda.

iii- Le troisième chapitre est focalisé sur le transport de matières dangereuses dans la région de Skikda. Un recensement des entreprises activant dans ce secteur est également établi, ce qui nous conduit à classifier les différentes matières dangereuses transportées dans cette région, en fonction de leurs modes de transport, leurs états physiques et leurs itinéraires. Ce chapitre présente également une analyse des risques liés aux TMD par canalisation dans la région de Skikda, ainsi qu'une étude comparative entre deux méthodes d'identification des dangers liés au transport de condensat dans la région de Skikda.

iv- Le quatrième et dernier chapitre passe en revue les modèles mathématiques de modélisation des phénomènes dangereux résultant des accidents liés aux TMD et présente les résultats de la modélisation des phénomènes dangereux liés aux différentes matières dangereuses transportées par canalisations dans la région de Skikda grâce au logiciel PHAST, ainsi que nos commentaires des résultats obtenus.

Nous terminons par une conclusion générale incluant les perspectives futures de notre travail de recherche

Chapitre I

*Etat de l'art sur les
risques liés aux transports
de matières dangereuses*

Introduction

L'industrie peut faire face à plusieurs types de risques, tel que les risques technologiques ou encore des risques liés aux transports de matières dangereuses. Ces matières dangereuses sont souvent transportées sous différentes formes : gaz ou liquide, sous pression ou cryogéniques et à travers différents mode de transports (routier, canalisation, ferroviaire ou maritime).

Ce chapitre a pour objet de présenter brièvement des généralités sur les risques, sur les matières dangereuses ainsi que les risques qui leurs sont liés en fonction des différents mode de transports utilisé à l'échelle mondiale, tout en passant par l'aspect règlementaire de la gestion du TMD en Algérie ainsi que dans d'autres régions du monde.

I.1. Notions générales sur les risques

I.1.1. Danger

La notion de danger définit une propriété intrinsèque à une substance (butane, chlore...), à un système technique (mise sous pression d'un gaz...), à une disposition (élévation d'une charge...), à un organisme (microbes), etc., de nature à entraîner un dommage sur un « élément vulnérable [1].

Ou encore comme « Une propriété intrinsèque d'une substance, d'un agent, d'une source d'énergie ou d'une situation qui peut provoquer des dommages pour les personnes, les biens et l'environnement» [Guide ISO/CEI 73, 2002].

Selon la norme ISO 45001 le danger est définit comme une source susceptible de causer traumatisme et pathologie [2].

I.1.2. Dommage

Le mot a aujourd'hui deux sens principaux :

- Celui de préjudice moral ou corporel, subie par quelqu'un et qui doit être réparée ; dégât matériel causé à quelque chose,
- Celui de regrettable, de fâcheux. Le dommage apparaît comme étant un phénomène regrettable qui cause préjudice. D'où la qualification de dommages-intérêts pour l'indemnisation ou la réparation. Le mot dommage appartient essentiellement au vocabulaire de l'indemnisation. Peu utilisé par le vocabulaire de la prévention, il se cache derrière des termes plus spécifiques comme accident du travail, maladie professionnelle, catastrophe, pollution, incendie, etc.

Le **dommage** est une atteinte à l'intégrité mentale ou physique, c'est un évènement non souhaité.

I.1.3. Evènement indésirable

Evènement indésirable (appelé aussi évènement redouté, évènement non souhaité, évènement top ...etc) se définit comme suite :

- C'est une Situation qui s'écarte des procédures ou des résultats escomptés dans une situation habituelle et qui est ou qui serait potentiellement source de dommages

Il existe plusieurs types d'EI :

- Dysfonctionnement (anomalie, non-conformité, défaut)

- Incident
 - Événement sentinelle, Précurseur, Presqu'accident
 - Accident
- Accident, incident ou dysfonctionnement dont les conséquences sont ou auraient pu être dommageables,

I.1.4. Événement dangereux

Événement capable de provoquer un dommage (accident ou atteinte à la santé), il se caractérise par sa probabilité d'apparition. Il peut se produire sur une période courte ou au contraire sur une période prolongée (notion d'exposition à long terme)

I.1.5. Situation dangereuse

Toute situation dans laquelle une (plusieurs) personne(s) est (sont) exposée(s) à un ou plusieurs dangers. L'exposition peut entraîner un dommage immédiat ou à plus long terme.

I.1.6. Phénomène dangereux

- Un phénomène dangereux est défini comme un phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs. [3]
- Il correspond à une libération d'énergie ou de substance produisant des effets susceptibles d'infliger un dommage à des enjeux humains ou matériels. [4]

I.1.7. Risque

Le risque est défini, de façon générale, comme étant lié à un danger ou un inconvénient plus ou moins probable auquel un individu ou un système est exposé [Larousse, 2012]. La notion de risque est utilisée dans de nombreux domaines. Il peut être industriel, sanitaire, environnemental, alimentaire, médical ou bien encore financier.

Longtemps assimilée à la notion de danger, la notion de risque est cependant à dissocier de celle-ci. Le danger correspond en effet à la propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique à pouvoir provoquer des dommages [SEVESO II, 1996]. En d'autres termes, pour qu'il y ait un risque, il faut qu'une cible (une personne, un processus ou encore une entreprise) soit en présence d'un danger. Ainsi, lorsqu'un danger est présent, un événement redouté, dont l'occurrence est incertaine (notion de probabilité), peut survenir et entraîner des dommages pour la cible (notion de gravité) [AFNOR, 2009]. Plusieurs définitions du risque peuvent être rencontrées :

- [Villemeur, 1988] : Mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences.
- [European Council, 1997] : Probabilité pour qu'un effet spécifique se produise dans une période donnée ou dans des circonstances déterminées.
- [Gouriveau, 2003] : Association des caractéristiques des événements causes et conséquences d'une situation donnée.
- [Guide ISO/CEI 73, 2002] : combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences. Le terme «risque» est généralement utilisé uniquement lorsqu'il existe au moins la possibilité de conséquences négatives.

Dans certaines situations, le risque provient de la possibilité d'un écart par rapport au résultat ou à l'événement attendu.

I.1.8. Principales dimensions du risque

Nous observons que le risque est très souvent défini par une relation entre l'occurrence d'un événement (généralement appelé probabilité) et ses conséquences (généralement appelé gravité). La combinaison de ces deux mesures permet de définir la notion de criticité, calculée par le produit des mesures de probabilité et de gravité associées à un risque [AFNOR, 2009].

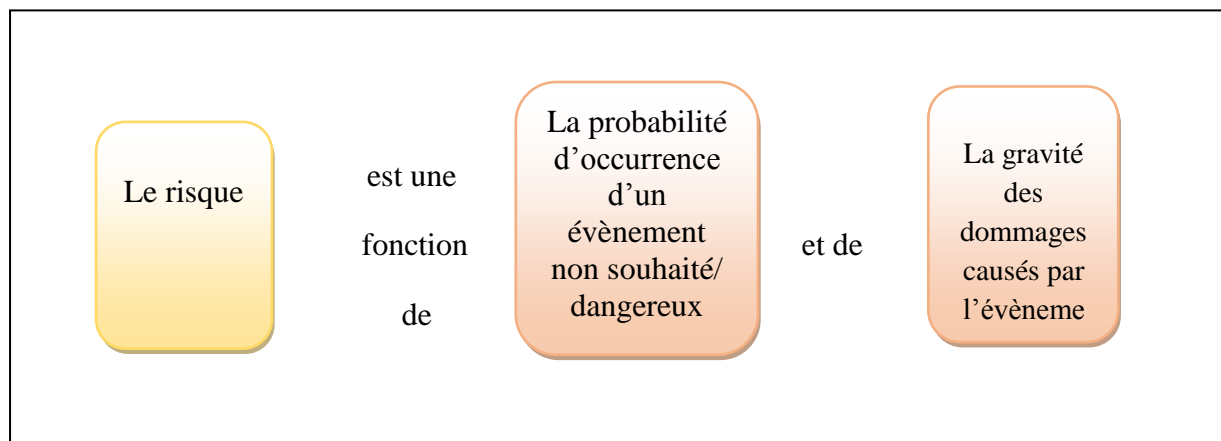


Figure I.1. Dimensions du risque

- **PROBABILITE** : Elle est définie par la probabilité d'enchaînement des événements conduisant à l'évènement non souhaité (ENS). Dans certain cas, on peut aussi utiliser le terme « FREQUENCE »

- **GRAVITE** : Elle est définie par l'effet des évènements non souhaitées sur les cibles.

En outre, la notion de criticité permet de définir les limites pour lesquelles un risque est considéré comme acceptable ou non. De manière plus formelle, un risque peut être mesuré par sa criticité, qui est la fonction de sa probabilité et de sa gravité :

$$C = P \times G$$

Tableau I.1- Exemple d'échelles de la gravité (Entreprise-SONATRACH) [5]

Gravité	Personnel	Environnement	Public	Production/biens
G4	Plusieurs décès	Pollution hors limites de longue durée	Décès	Domage important et arrêt total de la production
G3	Incapacité permanente ou un décès	Pollution interne non maîtrisée ou pollution hors limite maîtrisée	Blessures significatives	Domage localisé et arrêt partiel d'unité
G2	Blessures significatives	Pollution interne maîtrisée	Blessures mineures	Domages mineurs et arrêt bref de la production

G1	Blessure mineures	Mineure	Pas d'incidence	Pas de dommage, pas d'arrêt de production
----	-------------------	---------	-----------------	---

Tableau I.2 - Exemple d'échelle de la probabilité (Entreprise-SONATRACH) [5]

Probabilité	Description	Fréquence
P4	Très probable S'est produit fréquemment au sein de SONATRACH.	1/ an
P3	Probable S'est produit (ou pourrait se produire) au sein de SONATRACH, pourrait se produire pendant la durée de vie de l'installation	10^{-2} à 10^{-1} /an
P2	Peu probable Déjà (ou pourrait se) rencontré dans une organisation similaire à SONATRACH	10^{-4} à 10^{-2} /an
P1	Improbable Jamais rencontré ou entendu parler mais physiquement possible (ou rarissime)	$<10^{-4}$ /an

I.2. Généralités sur les matières dangereuses et leurs modes de transport

I.2.1. Matières dangereuse :

I.2.1.1. Définition

Il existe plusieurs définitions d'une matière dangereuse, elles diffèrent selon la réglementation en vigueur dans chaque pays. Il faut noter que toute matière peut devenir dangereuse sous certaines conditions.

Selon le Décret exécutif n° 90-79 du 27 février 1990 portant réglementation du transport de matières dangereuses « *est qualifié de dangereux, tout produit ou matière qui mettent en danger, causent des dommages, nuisent à la santé* [6] ».

Selon l'ADR (Accord for Dangerous goods by road) [7] « *Une marchandise est considérée comme dangereuse lorsqu'elle présente un risque pour l'homme ou l'environnement. Elle répond alors à différents critères de classement. Elle peut être une matière, un objet, une solution, un mélange, une préparation ou un déchet.* »

I.2.1.2. Classification

Pour mieux définir les Matières Dangereuse et surtout pour les gérer, des classifications ont été mises en place à l'échelle internationale et nationale.

Au niveau national, selon le Décret exécutif n° 90-79 du 27 février 1990 [6], les matières dangereuses sont classées par famille de produits dans neuf (09) classes, en fonction de leurs caractéristiques propres ainsi que de la nature des dangers qu'elles présentent :

- classe I: matières et objets explosifs,
- classe II: gaz, comprimés, liquéfiés, dissous sous pression, ou liquéfiés à très basse température,
- classe III: matières liquides inflammables,

- classe IV: matières solides inflammables, matières inflammables spontanément, matières qui, au contact de l'eau, émettent des gaz inflammables,
- classe V: matières comburantes, peroxydes organiques,
- classe VI: matières toxiques et matières infectieuses,
- classe VII: matières radioactives,
- classe VIII: matières corrosives,
- classe IX: matières dangereuses diverses.

Au niveau international, plus précisément en Europe, l'Accord Européen relatif au Transport International des Marchandises Dangereuses par Route, où cinquante-et-un États ont ratifié l'ADR (Accord for Dangerous goods by road), les matières dangereuses sont classées en neuf classes [7]:

Classe 1 : Matières et objets explosibles

Classe 2 : Gaz

Classe 3 : Liquide inflammable

Classe 4.1 : matières solides inflammables, matière auto-réactive, matière solides explosibles

Classe 4.2 : matières sujettes à l'inflammation spontanée

Classe 4.3 : Matières qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammable

Classe 5.1 : Matière comburante

Classe 5.2 : Peroxyde organique

Classe 6.1 : Matières toxiques

Classe 6.2 : Matières infectieuses

Classe 7 : Matières radioactives

Classe 8 : Matières corrosives

Classe 9 : Matières et objets dangereux divers



Figure I.2. Pictogramme des différentes classes des matières dangereuses [8]

Il y a aussi *Le système général harmonisé (SGH) de classification et d'étiquetage des produits chimiques* (en anglais : *Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals, GHS*), qui est considéré comme un système international d'étiquetage des matières dangereuses. Suite à l'adoption par le Parlement européen et le Conseil du règlement CLP (Classification, Labelling and Packaging ; règlement (CE) n° 1272/2008), entré en vigueur le 20 janvier 2009, l'Europe est devenue le premier grand espace économique à mettre en œuvre le SGH dans sa législation sur les produits chimiques. En 2016, le règlement CLP été complètement appliqué, remplaçant définitivement les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE [9].

Le système général harmonisé répartit les produits en « classes de danger ». Il y a 28 classes de dangers regroupées sous 3 groupes de danger : *danger physique*, *danger pour la santé* et *danger pour l'environnement*.

Ces classes sont répertoriées sous neuf sortes de pictogrammes, qui sont :

SGH01 : explosif, autoréactif

SGH02 : facilement inflammable, extrêmement inflammable

SGH03 : comburant

SGH04 : explosif, extrêmement inflammable

SGH05 : corrosif, irritant

SGH06 : toxique, très toxique

SGH07 : irritant

SGH08 : toxique, très toxique, nocif, irritant

SGH09 : dangereux pour l'environnement



Figure I.3. Pictogramme de la réglementation CLP [9]

I.2.1.3. Mode de transport :

Il existe quatre modes de transport, qui sont utilisés pour transporter toutes sortes de matières dangereuses, il y a :

- le transport routier. Par camions, c'est le mode le plus fréquemment utilisé de par sa rapidité, sa flexibilité et son coût économique
- le transport ferroviaire. Les matières dangereuses sont transportées dans des wagons, ce mode de transport peut être combiné avec le transport routier
- le transport par canalisations. Ce type de transport permet de déplacer des liquides ou des gaz de manière continue ou séquentielle. Il est utilisé pour le transport du gaz naturel (gazoducs), des hydrocarbures liquides ou liquéfiés (oléoducs, pipelines), certains produits chimiques (éthylène, propylène, etc.).
- Le transport maritime. Utilisé dans le secteur du commerce international, ce mode de transport présente un avantage de couvrir des zones de livraison les plus étendues du globe et une grande capacité de transport.

I.2.2. Cadre législatif entourant le transport de matières dangereuses

I.2.2.1. Règlementation Algérienne :

Plusieurs décrets exécutifs ainsi que des arrêtés interministériels ont été mis en place pour faciliter la gestion du transport de matières dangereuse en Algérie [10].

Le tableau I.3, ci-dessous, résume les différentes lois qui régissent le transport de matières dangereuses en Algérie.

Tableau I.3 – décrets exécutifs et arrêtés interministériels régissant la gestion du TMD en Algérie [10]

Date	Nature de la loi	Contenu
27 février 1990	décret exécutif n° 90-79	Réglementation du transport de matières dangereuses ;
18 août 1990	le décret exécutif n° 90-245	Réglementation des appareils à pression de gaz
1 ^{er} Décembre 2003	Décret exécutif n° 03-452	Fixe les conditions particulières relatives au transport routier de matières dangereuses
20 décembre 2004	Décret exécutif n° 04-415	Fixe les conditions de délivrance des autorisations d'exercice des activités de transport routier de personnes et de marchandises
12 janvier 2010	Décret exécutif n° 10-19	Modifie et complète le décret exécutif n° 03-451 du 7 Chaoual 1424 correspondant au 1er décembre 2003 définissant les règles de sécurité applicables aux activités portant sur les matières et produits chimiques dangereux ainsi qu'aux récipients de gaz sous pression.
19 juin 2014	Arrêté interministériel	Fixe les conditions et modalités d'acquisition sur le marché national des matières et produits chimiques dangereux par les personnes physiques ou morales dont les activités professionnelles ou personnelles nécessitent l'emploi de matières et/ou produits chimiques dangereux de manière ponctuelle, circonstancielle et/ou accessoire
8 juillet 2014	Arrêté interministériel	Fixe les conditions et modalités de délivrance de l'agrément des opérateurs pour l'exercice des activités nécessitant l'emploi des matières et produits chimiques dangereux ainsi que les récipients de gaz sous pression.
15 juin 2015	Arrêté interministériel	Fixe les vitesses maximales des véhicules de transport de personnes et de marchandises dont le poids total autorisé en charge, remorques

		comprises, est supérieur à 3,5 tonnes
25 novembre 2015	Arrêté interministériel	Fixe la liste et la classification des matières et produits chimiques dangereux
29 décembre 2016	Arrêté interministériel	Modifie et complète l'arrêté interministériel du 10 Ramadhan 1435 correspondant au 8 juillet 2014 fixant les conditions et modalités de délivrance de l'agrément des opérateurs pour l'exercice des activités nécessitant l'emploi des matières et produits chimiques dangereux ainsi que les récipients de gaz sous pression

- On note que l'Algérie a ratifié la convention relative aux transports internationaux ferroviaires (COTIF) [11].

I.2.2.2. Règlementation Européenne

- Transport fluvial (ADN) : Le transport fluvial en Europe est règlementé par un texte intitulé ADN10 (Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voie de navigation intérieure) rédigé au sein de la CEE-ONU située à Genève en Suisse [12].
- En Europe, le transport routier de matières dangereuses est encadré par l'Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route appelé aussi ADR. Rédigé le 30 septembre 1957 et entré en vigueur le 29 janvier 1968, il a été restructuré depuis le 1er juillet 2001. Actuellement, suite aux divers amendements par le Groupe de travail des transports de marchandises dangereuses, la dernière version de l'ADR est en vigueur depuis le 1er janvier 2021. [7].
- Le transport International ferroviaire des marchandises Dangereuses dit RID : il est règlementé par la Convention relative aux transports internationaux ferroviaires (COTIF), où l'Appendice C qui concerne le règlement du transport International ferroviaire des marchandises Dangereuses [11].

I.2.2.3. Règlementation Américaine

Aux États-Unis, la réglementation qui gère les transports de marchandises dangereuses est le CFR49 (Code of Federal Regulations – title 49 – Transportation). Il s'agit là de publications émanant de *l'US department of Transportation* qui regroupent non seulement le transport aérien mais également les transports terrestres et maritime.

Le règlement CFR (code des règlements fédéraux) est un ouvrage en plusieurs volumes. Regroupant 50 titres, chacun couvre un domaine spécifique [13].

I.2.2.4. Règlementation Canadienne

Au Canada le règlement sur le transport des marchandises, met le point sur la prévention d'incidents au cours de la manutention, la demande de transport, le transport et l'importation de marchandises dangereuses et il permet aussi d'élargir l'envergure de la capacité de réponse du gouvernement du Canada en cas d'incident, menaçant la sécurité et la sûreté, mettant en cause des marchandises dangereuses. Ce règlement est divisé en 16 parties, et il traite les différents modes de transport utilisé au cas : terrestre, maritime et aérien [14].

I.3. Risques liés aux transports de matières dangereuses

Le transport de matières dangereuses peut être à l'origine de nombreux accidents, ayant pour origine différentes causes (collision, renversement, incident technique, etc.) Lorsque l'accident conduit à une détérioration du conteneur, le produit peut s'échapper à l'extérieur.

L'accident peut alors prendre une forme identique à ce que l'on rencontre lors de la manifestation du risque industriel, on peut alors distinguer différentes catégories de risques, tel que [15] :

- Le risque d'explosion : l'explosion peut-être occasionnée par un choc avec production d'étincelles (notamment pour les citernes de gaz inflammables), par l'échauffement d'une cuve de produit volatil ou comprimé, par le mélange de plusieurs produits...

Une explosion peut aussi survenir suite à une rupture d'enceinte, due à la formation de mélanges particulièrement réactifs ou à un incendie, qui peut provoquer des effets thermiques, mais également mécaniques (effet de surpression), du fait de l'onde de choc. À proximité du sinistre et jusqu'à un rayon de plusieurs centaines de mètres, les blessures peuvent être très graves et parfois mortelles : brûlures, asphyxie, lésions internes consécutives à l'onde de choc, traumatismes dus aux projectiles.

- Le risque d'incendie : peut-être engendré par l'échauffement anormal d'un organe du véhicule, un choc contre un obstacle (avec production d'étincelles), l'inflammation accidentelle d'une fuite, une explosion au voisinage immédiat du véhicule, voire un sabotage. Un grand pourcentage des accidents de TMD concernent des liquides inflammables. Un incendie de produits inflammables solides, liquides ou gazeux engendre des effets thermiques (brûlures) qui peuvent être aggravés par des problèmes d'asphyxie et d'intoxication, liés à l'émission de fumées toxiques. Un incendie peut provoquer des brûlures à des degrés variables selon la distance à laquelle il se produit.

- La dispersion dans l'air (nuage toxique), l'eau et/ou le sol : peut provenir d'une fuite de produit toxique ou résulter d'une combustion (même d'un produit non toxique), qui se propage à distance du lieu de l'accident. En se propageant dans l'air, l'eau et/ou le sol, les matières dangereuses peuvent être toxiques par inhalation, par ingestion directe ou indirecte lors de la consommation de produits contaminés, par contact.

Les produits toxiques pénètrent principalement dans le corps par les poumons, mais la peau et les yeux risquent également d'être atteints. En fonction de la concentration des produits et de la durée de l'exposition aux produits, les symptômes peuvent varier d'une simple irritation de la peau ou d'une sensation de picotements de la gorge, à des atteintes graves comme des asphyxies ou des œdèmes pulmonaires. Ces effets peuvent être ressentis jusqu'à quelques kilomètres du lieu du sinistre.

L'eau est un milieu particulièrement vulnérable, qui peut propager une pollution sur de grandes distances. Un rejet liquide ou gazeux peut conduire à une pollution brutale ou différée de l'air, des eaux superficielles ou souterraines (nappe phréatique), avec risque d'atteinte de la flore, des fruits et légumes, de la faune, puis des hommes, au bout de la chaîne alimentaire.

Ces risques dépendent aussi des caractéristiques physico-chimiques des matières dangereuses transportées (qui peuvent se présenter sous forme : liquide, solide, gaz), du mode transport utilisé, certains éléments externes peuvent aussi constituer des facteurs aggravant les conséquences de ces risques, tel que : les conditions météorologiques/ état de la chaussée/ travaux à proximité [16].

I.3.1. Risques liés aux transports de matières dangereuses par route

De grandes quantités de matières dangereuses sont transportées par voie routière, en utilisant des camions citernes ou bien les bouteilles de gaz.

Chaque matière dangereuse a ses propres caractéristiques physico-chimiques, de plus d'être confinée, du coup la nature du risque dans ce mode de transport dépend des caractéristiques des matières dangereuses et le type de l'environnement extérieur.

Durant le transport routier, le risque est transféré à l'extérieur du site industriel et peut causer des dommages aux populations ainsi qu'à l'environnement (voies de circulation, passage à travers des zones urbanisées,... etc.).

Différents aléas doivent être pris en compte lors du transport :

- Rupture du flexible lors du chargement ou déchargement,
- Défaillance du raccord
- Les accidents de la route auxquels seraient exposés les camions citernes,
- L'état de la chaussée,
- La défectuosité du système de freinage,
- Les facteurs météorologique durant le transport,... etc.

I.3.2. Risques liés aux transports de matières dangereuses par canalisation :

Les canalisations de transport constituent le moyen le plus répandu et le plus sûr pour transporter les matières dangereuses par voie terrestre. Toutefois, des pertes de confinement peuvent survenir, dont les principales causes peuvent être comme suite [17] :

- des travaux d'excavation à proximité de la canalisation,
- des phénomènes de corrosion externe et/ ou interne
- des défauts de matériau ou de construction,
- des événements naturels

I.3.2.1. La corrosion

La corrosion est le phénomène de dégradation le plus fréquent dans les unités de procédés. La corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte plusieurs métaux, elle résulte d'interactions chimiques et/ou physiques entre le matériau et son environnement [18].

La première manifestation de la corrosion est d'ordre visuel : On constate le phénomène par sa localisation ou par la modification de l'aspect extérieur de l'objet qu'il affecte. Aussi, les diverses formes de corrosion que l'on rencontre ont souvent un nom évocateur de la manière dont elles se manifestent [19]. C'est le cas de la corrosion générale, de la corrosion par piqûres, ou encore de la corrosion inter-granulaire. D'autres formes de corrosion portent un nom associé au mécanisme mis en œuvre. C'est le cas de la corrosion sous contrainte, de la corrosion par effet de crevasse ou de la corrosion-érosion.

Parmi les types de corrosion on peut citer :

- La corrosion sèche
- La corrosion aqueuse
- La corrosion généralisée ou uniforme
- La corrosion atmosphérique
- La corrosion localisée
- La corrosion galvanique
- La corrosion par piqûres
- La corrosion par effet de crevasse
- La corrosion inter-granulaire
- La corrosion-érosion et la corrosion-cavitation
- La corrosion sous contrainte
- La fatigue-corrosion

- La fragilisation par l'hydrogène
- La bio corrosion

I.3.2.2. Risques liés à la pression

Le transport des hydrocarbures par canalisation nécessite de construire un ouvrage résistant à une pression interne justifiée par les pertes de charge, qu'engendre une colonne liquide en déplacement [20]. Ces pressions évoluent pour :

- écoulement stable, elles dépendent du débit
- écoulement transitoire, des surpressions et des dépressions brutales peuvent apparaître par la génération de coups de bélier provenant soit de la fermeture de vanne soit d'un déclenchement de groupes de pompage.
- Coup de bélier : on appelle coup de bélier un phénomène constaté dans les conduites où circule un liquide et se manifestant par des chocs plus ou moins violents. Le phénomène a pour cause une : fermeture/ ouverture de robinets, démarrage/ arrêt de pompe (en particulier à distance)

I.3.2.3. Risque de surpression

Contrairement aux liquides, les variations brutales de débit localisées ne provoquent pas de coup de bélier.

L'excès de pression peut être d'origine interne ou externe à l'équipement [20].

- Surpression d'origine interne à l'équipement :
 - Sur-remplissage
 - Présence de produit à tension de vapeur plus élevée que prévue
 - Erreur opératoire, dérèglement du procédé ...
 - Emballement de réactions chimiques
- Surpression d'origine externe à l'équipement
 - Incendie
 - Expansion thermique
 - Perte de refroidissement

I.3.2.4. L'éclatement

Un éclatement est l'incident le plus grave qui puisse survenir sur une canalisation de transport d'hydrocarbures dans la mesure où il peut générer à la fois du danger pour les biens et les personnes, des pertes économiques importantes pour l'entreprise, des perturbations de l'exploitation de l'ouvrage. Il consiste en l'endommagement de la paroi de la conduite depuis sa déchirure sur quelques dizaines de centimètres, longitudinalement, transversalement ou en spirale jusqu'à sa rupture franche sur plusieurs mètres ou même dizaines de mètres. C'est un événement subit, incontrôlable et imprévisible qui entraîne le plus souvent une perte importante de produit (plusieurs centaines ou milliers de mètres cube pour les liquides et des millions de mètres cubes pour les gaz). Sauf dans certains cas exceptionnels, un éclatement est généralement décelable, peu de temps après sa survenance, à partir des modifications des paramètres de fonctionnement de l'ouvrage que sont le débit et la pression. Lors d'un éclatement sur une canalisation on constate généralement une augmentation sensible du débit et une chute de la pression dans la canalisation, à la sortie de la station située en amont du point d'incident [17].

I.3.3. Risques liés au transport par voie ferroviaire

De nombreuses matières dangereuses sont transportées en utilisant les chemins de fer, notamment les gaz de pétrole liquéfiés et cela par wagons-citernes.

Ce mode de transport n'échappe pas aux différents risques liés aux TMD, vue précédemment : incendie, explosion ainsi que la pollution atmosphérique et environnementale. Se rajoute à ces

risques, les zones à concentration de risques où se fait le stationnement des wagons de matières dangereuses (les gares de triage et les gares d'expédition).

Les accidents de chemin de fer résultent soit d'une erreur de la part du personnel d'exploitation du chemin de fer, soit d'une défaillance technique de la voie, du matériel roulant ou de l'équipement de signalisation et de contrôle des trains. (Les accidents aux passages à niveau ferroviaires causent généralement des dommages minimes au train en cause, mais peuvent être assez graves pour les véhicules routiers.) De telles erreurs ou défaillances peuvent entraîner une collision entre trains, une collision entre un train et un autre obstacle, ou un déraillement où un train perd le contrôle et sort de la voie [21].

Le tableau I.4, ci-dessous, énumère différentes causes possible d'accidents ferroviaires liés aux transports de matières dangereuses.

Tableau I.4 – Causes possibles d'accidents ferroviaires liés au transport de matières dangereuses [21]

Erreurs humaines	Défaillance techniques	Défaillance liés aux procédures	Evènement externe
-commutation -couplage -le transbordement -inertie -contamination -chauffage -refroidissement -trop remplir -excès de vitesse -signaux de blocage -déficience motrice	et - locomotive non dédiée - échec de la garde croisée - surpression - soupape de fuite - défaillance du roulement à rouleaux - échec de couplage - rail cassé - défaillance des freins - défaillance de la plateforme - revêtement de protection / isolation / défaillance de protection thermique - échec de la protection - défaillance du dispositif de secours - défaillance du capteur de piste - défaillance de l'appareillage - défaillance du signal - défaillance du système de communication - roue cassée - défaillance de la suspension - défaut de montage - corrosion - défaut matériel - mauvaise soudure	-routage -contrôle : chantiers / ligne principale / en usine -stockage provisoire sur la piste d'attente -suivi de voiture -réceptif -spécification -urgence -formation à la réponse -entretien -inspection -routage en circuit	-vandalisme / sabotage -passage à niveau -inondation / lavage -tremblement de terre -éboulement / glissement de terrain -avalanche -feu sur la voie d'évitement -brouillard / blizzard -échec du pont

I.3.4. Risques liés aux transports de matières dangereuses par voie Maritime

Lors d'un accident lié aux transports de TMD par voie maritime, le déversement de matières dangereuses telles que les hydrocarbures est facilement reconnaissable. La pollution se voit et se sent. Les produits chimiques sont plus difficilement identifiables. En cas de déversement en mer ou à la côte, identifier le plus rapidement possible le produit en cause permet de prendre les mesures de protection appropriées.

Les matières dangereuses transportées en vrac sont acheminées par des navires spécialisés et clairement identifiés par les autorités maritimes. En cas d'accident, l'identification du polluant et des risques associés est donc facilitée.

Cela s'avère, en revanche, beaucoup plus complexe lorsque les marchandises dangereuses sont transportées en colis à bord des porte-conteneurs. La difficulté est grande d'identifier rapidement les produits concernés lors de perte de cargaison et le risque d'interaction entre les produits à bord est élevé en cas d'incendie, l'identification du produit et des risques encourus est souvent compromise par le fait que les étiquettes de danger ont disparu au contact de l'eau de mer. Dans ce cas, une précaution maximale s'impose.

I.4. Gestion des risques liés au transport de matières dangereuses

Un objectif majeur du transport sûr et sécurisé des matières dangereuses est la réduction des incidents pouvant conduire à un rejet ou à une mauvaise utilisation. À ce jour, les réalisations en matière de sécurité sont le résultat de réglementations, de normes industrielles, d'investissements dans la formation, les systèmes et la technologie. Mais le transport sécuritaire des matières dangereuses demeure complexe en raison d'un certain nombre de problèmes [22], tel que :

- Nombre de matières dangereuses réglementées (des milliers sont répertoriés dans les réglementations du monde entier)
- Réglementations qui varient selon le mode de transport
- Différentes classes de dangers, y compris la toxicité, l'inflammabilité, la corrosivité et la réactivité
- Divers modes de transport, notamment routier, ferroviaire, maritime, pipeline.
- Utilisation de plusieurs modes lors d'un envoi (intermodal)
- Voies de transport où le profil de risque peut changer en fonction de la proximité du public ou d'autres zones sensibles

La complexité de ces activités, même avec les règles de sécurité et les pratiques d'exploitation actuelles, est l'une des raisons pour lesquelles des accidents impliquant le transport de matières dangereuses se produisent.

La gestion du transport de matières dangereuses peut être conceptualisée et inclut plusieurs paramètres, tel que : les moyens de transport, l'heure d'expédition, les plans de sécurité, les interventions d'urgence, etc. Les moyens de maîtrise des risques sont évalués et comparés au coût impliqué. Après analyse de tous les facteurs de préoccupation, un plan de sécurité pour les risques peut être établi. Ce plan est généralement mis en œuvre partiellement, et sera revu en cas d'accident.

Il existe deux approches pour une bonne gestion des risques liés au transport de matières dangereuses [23] :

- a) Après la survenue d'une catastrophe, des enquêtes et des examens de l'accident, de ses causes et des dommages occasionnés auront lieu. Une nouvelle réglementation ou une nouvelle application sera mise en œuvre en réponse à la catastrophe. Puis avec le temps et l'expérience, ces mesures sont évaluées en considérant l'amélioration du taux d'incidents ou du nombre d'infractions, etc.
- b) La deuxième approche implique l'audit gouvernemental et l'approbation d'un processus global de gestion des risques et d'un plan de sécurité à établir par l'industrie ou les entreprises de transport. Le plan est évalué en fonction de l'atteinte probable des niveaux de risque acceptables, etc.

Le tableau I.5 illustre quelques accidents de transport de matières dangereuses dans divers pays et selon différents modes de transport.

Tableau I.5- Quelques accidents liés au transport de matières dangereuses

Date et lieu	Description
BOUGHALBOUN – SKIKDA 18/02/2008 à 13h30	Localisation : PK 539+019 du Gazoduc GK2/42''- Hassi R'mel – Skikda. La canalisation a été endommagée suite à un perçage par le foret d'une machine de carottage appartenant à LTP Est Constantine, travaillant pour le compte du consortium COJAAL, chargé de la réalisation de l'autoroute Est-Ouest. L'endommagement est caractérisé par une entaille de forme curviligne d'une longueur de 40 mm et d'une largeur de 08 mm, engendrant une fuite de gaz naturel. Les caractéristiques du tube à cet endroit : L'intervention sur le pipe a duré jusqu'au 23/02/2008. [24]
DIYAR ELZAYTOUN- AZZABA 27/11/2006- 13h02	une déviation d'un train transportant des marchandises et du carburant, où environ 420000 litres de carburant s'écoulent dans le détachement DIAR ELZAYTOUN. Le crash de 07 citernes a détruit la voie ferrée sur une longueur de 800 m, et a causé la mort d'une personne (01) et a blessé (06) autres. [25]
AL-HAROUCHE – SKIKDA 14/08/2013- 00h57	Un train de marchandises composé de 10 wagons, 06 wagons à blé (60 tonnes par chariot), 04 wagons à carburant (60 m ³ pour le réservoir) s'est renversé - Des pertes ont été enregistrés. Six personnes ont été blessées et transférées à l'hôpital Al-Harouch. - Les 10 wagons ont été détruits et environ 30 mètres de la voie ferrée ainsi qu'une partie du pont ont été endommagés [25]
QUEBEC – LAC MEGANTIC 06/07/2013	le train de marchandises MMA-002, qui était garé sans surveillance pour la nuit à Nantes (Québec), a commencé à se déplacer. Le train a roulé sur environ 7,2 milles, atteignant une vitesse de 65 mi/h. Vers 1 h 15, lorsque le train s'est approché du centre de la ville de Lac-Mégantic (Québec), 63 wagons-citernes qui transportaient du pétrole brut (UN 1267), et 2 wagons couverts ont déraillé.

	<p>Environ 6 millions de litres de pétrole brut se sont déversés. Des incendies se sont déclarés et des explosions se sont produites, détruisant 40 édifices, 53 véhicules et les voies ferrées à l'extrémité ouest du triage Megantic. Quarante-sept personnes ont subi des blessures mortelles. Le centre-ville ainsi que la rivière et le lac adjacents ont été contaminés. [26]</p>
<p>HIDALGO - MEXIQUE 18 janvier 2019</p>	<p>Le 18 janvier 2019, un pipeline transportant de l'essence a explosé dans la ville de Tlahuelilpan, dans l'État mexicain d'Hidalgo. L'explosion a tué au moins 135 personnes et en a blessé des dizaines d'autres. La fuite a été signalée à 17h04 CST (11h04 UTC) et l'explosion s'est produite deux heures plus tard à 19h10. Il a fallu environ quatre heures aux intervenants pour éteindre le feu [27].</p>
<p>DAKOTA – CANADA 16/11/2017</p>	<p>Le 16/10/2017, à 4 h 34, le pipeline Keystone s'est rompu, le système de contrôle de surveillance et d'acquisition de données de Keystone a détecté une fuite et a fermé le pipeline. Le personnel de terrain s'est rendu à l'emplacement de fuite indiqué, a confirmé que le pipeline s'était rompu et a lancé son plan d'intervention en cas de déversement. La zone de déversement approximative était composée d'environ 5 000 barils de pétrole brut.</p> <p>La première indication de la rupture du pipeline s'est produite à 5 h 33, lorsqu'une chute brutale de la pression de refoulement et une augmentation correspondante du débit ont été observées à la station de pompage de Ludden. L'arrêt d'urgence du pipeline a été lancé à 5 h 36. À 5 h 45, l'emplacement de la panne avait été isolé à l'aide de vannes télécommandées [28].</p>
<p>CHINE 06/01/2018</p>	<p>Collision entre un pétrolier et un vraquier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le pétrolier long de 274 m battait pavillon panaméen. Il venait d'Iran et se dirigeait vers Daesan en Corée du sud. - Le vraquier battait pavillon hongkongais. Il venait des Etas-Unis et se dirigeait vers la Chine <p>A 300 km au large de Shangai, une collision se produit vers 13 h entre un pétrolier transportant 136 000 t de condensats (hydrocarbures légers) et un vraquier transportant 64 000 t de céréales. Le choc provoque l'incendie du pétrolier. Un important panache de fumée noire se dégage. Les 32 membres d'équipage du pétrolier sont portés disparus. Les 21 membres de l'équipage du vraquier sont secourus.</p> <p>La totalité de la cargaison est brûlée ou répandue en mer. Une nappe de pollution de 70 km² est alors visible. La nappe d'hydrocarbures s'étend sur 140 km² le 18/01 et de 332 km² le 22/01. [29]</p>
<p>BASSENS (GIRONDE) - FRANCE</p>	<p>Incendie et explosions de camions-citernes dans une entreprise de TMD</p>

3/04/ 2016	<p>Le feu a pris à 5h37 sur un camion-citerne de GPL d'un volume de 20 m³, et s'est propagé à 7 autres véhicules du même type. Deux BLEVE de citernes se sont produits à 7h14 et 7h33.</p> <p>Quatre blessés légers sont à déplorer parmi les pompiers. Les pompiers n'ont pas entendu de sifflement caractéristique de l'imminence d'un BLEVE permettant de les alerter, ils se situaient à environ 40 m du lieu de l'incendie, protégés par des véhicules, lorsque le second BLEVE s'est produit. Ils ont repris la lutte après le second BLEVE et ont réussi à maîtriser l'incendie à 9 h. Aucun riverain n'a été atteint.</p> <p>Les locaux de l'entreprise, qui se situent à environ 200 mètres, et les locaux des entreprises voisines ont subi principalement une onde de choc (dégâts aux structures, bris de vitres jusqu'à 700 m).</p> <p>Les deux citernes ayant subi le BLEVE contenaient respectivement 1,5 t et 2,5 t de GPL. Le tonnage total de GPL détruit dans le sinistre est estimé à 5 tonnes. [29]</p>
------------	---

I.5. Causes possibles d'un accident lié au transport de matières dangereuses

Les causes d'un accident lié au transport de matières dangereuses peuvent être divisées en deux catégories :

- Causes internes : Désignent les causes liées à l'équipement de transport, comme : défaillance de conception, défaillance mécanique, défaillance électrostatique, corrosion ...
- Causes externes : relatives aux conditions météorologiques, phénomènes naturels, état de la chaussée, travaux à proximité, actes de sabotages/malveillances ...

Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation des concepts théoriques de base qui ont un intérêt avec notre travail, en l'occurrence, les risques et le transport de matières dangereuses.

L'accent a été mis également sur les risques liés aux transports de matières dangereuses, en fonction de chaque mode transport, qui sont considérés comme risques majeurs importants, d'où l'intérêt de mener une étude d'analyse des risques liés aux TMD.

En conséquence, le chapitre suivant sera consacré à la description de quelques méthodes d'analyse des risques, ainsi que la démarches que nous allons adopter pour réaliser une analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses.

Références bibliographique

- [1].G 4 218- Quantification du risque dans le cadre des études de dangers, Olivier IDDIR, Article TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR, 10/10/2013
- [2].ISO 45001:2018 Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail — Exigences et lignes directrices pour leur utilisation
- [3].Valérie de Dianous, Céline Deust, Charlotte Bouissou, Régis Farret, Sylvain Chaumette. Prise en compte de la probabilité dans les études de dangers. Préventique Sécurité, 2007, pp.32-37.ineris00961915
- [4].INERIS : <https://www.ineris.fr/fr/risques/comment-evaluer-risque/evaluer-risque-accidentel/phenomenes-dangereux-accidentels>, consulté le 20/12/2020
- [5].Rapport d'analyse de risque de l'unité OMJ82, SONATRACH DP/HMD – OMJ82, 2013
- [6].JO N° 10 du 07 Mars 1990, document JORADP
- [7].Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route, ECE/TRANS/242 (vol I), Nations Unies – NewYork et Genève, 2014
- [8].ED 6134 - Le transport des matières Dangereuse L'ADR en question, document INRS, 2020
- [9].ED 6197- dans mon entreprise j'étiquette les produits chimiques, Annabel Maison, INRS, 2015
- [10]. Journal officiel de la république algérienne démocratique et populaire, <https://www.joradp.dz>
- [11]. Convention relative aux transports internationaux ferroviaires, Appendice C : Règlement concernant le transport International ferroviaire des marchandises Dangereuses dit RID, Organisation intergouvernementale pour les transports internationaux ferroviaires OTIF, 2015
- [12]. Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieurs ADN, ECE/TRANS/190 (vol I), Nations Unies – NewYork et Genève, 2006
- [13]. Règlementation CFR49, US department of Transportation, <https://www.transportation.gov>
- [14]. Règlement sur le transport des marchandises dangereuses DORS/2001-286, loi de 1992 sur le transport des marchandises dangereuses, <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements>
- [15]. Ingrid Peignier, Gestion des risques reliés au transport matières dangereuses au Québec - *un outil d'aide à la décision pour le choix des transporteurs*, Université de Montréal, 2010
- [16]. E.L.A.E.L. Safadi, Contribution à l'évaluation des risques liés au transport de matières dangereuses en prenant en compte les incertitudes. Automatique / Robotique. Université Grenoble Alpes, 2015
- [17]. DRA - 13 - 133665-09977C, Guide : Canalisations de transport - Guide de détermination des mesures de protection propres aux bâtiments. Version 2, INERIS, décembre 2016
- [18]. KOUACHE AMEL, Ammonium quaternaire du platformat : synthèse et application à l'inhibition de la corrosion acide d'acier, Mémoire De Magister En Génie des Procédés Spécialité : Génie de l'Environnement, Université Saad Dahlab De Blida, 2011
- [19]. M. HÉLIE, Matériaux Métalliques - Phénomènes De Corrosion : Produits de corrosion et couche d'oxyde à la surface d'un acier, Commissariat à l'Énergie Atomique/ Service de Corrosion et du Comportement des Matériaux dans leur

- Environnement, Université d'Evry - Val d'Essonne/ Département Sciences des Matériaux/IUP 2 - Génie des Matériaux
- [20]. Mourad NAHAL, Etude Mécano-Fiabiliste Des Pipelines Destinés Aux Hydrocarbures, thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur/Département de Génie Mécanique, Université BADJI –MOKHTAR, ANNABA.2016
- [21]. Guidelines for chemical transportation risk analysis, Center for Chemical Process Safety (CCPS), New York: AIChE, 1995
- [22]. Guidelines for Chemical Transportation Safety, Security, & Risk Management, CCPS Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, Wiley 2008
- [23]. MICHEL NICOLET-MONNIER, ADRIAN V. GHEORGHE, Quantitative Risk Assessment of Hazardous Materials : Transport Systems-Rail, Road, Pipelines and Ship, Springer Science+Business Media Dordrecht 1996, DOI 10.1007/978-94-017-2821-8
- [24]. Rapport d'intervention – fuite sur gazoduc GK2 au PK 539+019 – Boughalboun/Skikda, document SONATRACH RTE-Skikda
- [25]. Rapport lié aux accidents de transport par voie ferroviaire, Document Direction Générale Protection Civil Skikda, 2018
- [26]. Rapport D'enquête Ferroviaire R13d0054, Bureau de la Sécurité des Transport du Canada, 2014
- [27]. Article : Explosion d'un oléoduc au Mexique : le bilan atteint 85 morts, Journal Le Parisien, 21/01/2019
- [28]. National Transportation Safety Board, (2017), Pipeline Accident Brief, TransCanada Corporation Pipeline (Keystone Pipeline) Rupture, Amherst, South Dakota,
- [29]. Base de données ARIA, Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI), France. <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>

Chapitre II

*Approches et méthodes
d'analyse des risques
dans le secteur du transport
de matières dangereuses*

Introduction

Pour chaque étude sur les risques et leurs conséquences, il est nécessaire de choisir les méthodes d'analyses les plus adéquates et de s'appuyer sur les études précédemment réalisées. Dans ce chapitre, un état de l'art a été réalisé sur l'analyse des risques dans le secteur de transport de matières dangereuses, nous allons aussi voir les différentes approches de classifications des méthodes d'analyses des risques, ainsi que quelques exemples de méthodes utilisées dans le secteur du TMD. Pour conclure, nous allons expliquer la méthodologie qui sera suivie pour réaliser notre analyse sur les risques liés aux transports de matières dangereuses dans la région de Skikda.

II.1. Etat de l'art

Au cours de ces dernières années, de nombreux travaux de recherche se sont penchés sur la problématique de l'évaluation des risques sur le transport des matières dangereuses. Ces études se sont concentrées notamment sur la sécurité des transports par canalisation (Citro et Gagliardi [1]), le transport ferroviaire (Liu et al [2] ; Saat et al [3] ; Gheorghe [4]) et les transports routiers (Yang et al [5] ; Fabiano et al [6]).

La recherche sur le transport routier de matières dangereuses suit trois thèmes. Le premier concerne les méthodologies visant à améliorer les interventions d'urgence en fonction des propriétés des routes, des conditions météorologiques et des facteurs de trafic (Fabiano et al [6]). Le second est basé sur des méthodologies d'enquête et d'analyse des risques d'accident à partir de données historiques visant à déterminer les caractéristiques des accidents telles que la fréquence d'occurrence, les conséquences des accidents et l'identification des facteurs de causalité (Fabiano et al [7]; Zhou et al [8]). Le dernier thème porte sur la prise de décision visant à améliorer le choix de la capacité des camions (Guo et Verma, [9]).

Une des études menées par Fabiano et al [6], a présenté un modèle qui tient compte non seulement de l'évaluation des risques, mais aussi de l'optimisation de la planification d'urgence en énonçant le rôle des facteurs infrastructurels, météorologiques et de trafic. A partir d'un ensemble de données collectées dans le nord de l'Italie, ils ont proposé un modèle basé sur la théorie des graphes afin de minimiser le niveau de risque sous certains paramètres d'acceptabilité.

En règle générale, un accident de la route impliquant des matières dangereuses peut endommager les infrastructures routières, avoir des répercussions sur l'environnement et les humains. En ce qui concerne les dangers pour l'homme, le transport routier de matières dangereuses engendre des risques pour les personnes présentes sur la route (usagers) et les personnes le long des itinéraires (population environnante résidente). Il est donc essentiel d'obtenir des informations sur la fréquence et les conséquences que génère un accident de la route impliquant des marchandises dangereuses. La fréquence et les impacts peuvent dépendre: des effets d'un accident et de sa durée (Adler et al [10]); catégorie et dangerosité des marchandises transportées (Amezaga et al [11]); type d'accident, collisions primaires ou secondaires (Hong Yang et al [12]); typologie des routes (autoroute, artère, route urbaine, etc.); tronçons de route, par exemple droits, courbes, tunnel, pont, etc. (Kineder et al [13]); zones entourées traversées; structure de la chaussée; la vitesse.

D'autres recherches ont introduit le Système d'Information Géographique (SIG), comme le cas de l'équipe de recherche de Verter et Al [14], qui a introduit le SIG afin de mettre en œuvre à grande échelle l'évaluation des risques des expéditions dans un contexte d'origine-destination multiple. Le point intéressant dans cette étude, est que le processus d'optimisation prend en compte une mesure traditionnelle de l'économie des transports (minimisation de la distance) conjointement avec une série de matières dangereuses - transport - problèmes particuliers (exposition de la population, nombre de personnes à évacuer et probabilité de un incident). Le modèle a été appliqué aux provinces canadiennes de l'Ontario et du Québec et a pris en compte les expéditions par camion.

Dans le prolongement des grandes lignes de recherche, dans un article de Brown et Dunn [15] qui, sur la base d'une approche quantitative d'évaluation des risques, propose une méthode pour évaluer à quelle distance une intervention d'urgence doit être planifiée afin de protéger les personnes d'une inhalation danger qui suit le rejet accidentel de matières toxiques. La base de données considérée est liée aux différents États qui composent les États-Unis et les modes de transport considérés sont le transport routier et le transport ferroviaire.

Dans une autre analyse en considérant le mode de transport ferroviaire, Gheorghe et al. [16] se basent sur des données suisses pour proposer une approche pour l'évaluation des risques, qui se repose sur un calcul déductif de la fréquence de perte de confinement. Il met ensuite en œuvre une série de modèles analytiques afin d'évaluer les différents types d'impact d'un incident (exemple : décès et intoxication aiguë) et en recourant à des techniques analytiques plus poussées, il tente d'identifier les spots d'un territoire présentant la plus haute probabilité d'accidents. Les techniques susmentionnées sont ensuite intégrées afin de fournir une évaluation systématique des risques.

Quant au transport par canalisation, l'étude de Jo et Ahn [17] considère un modèle destiné à réduire le niveau de risque comme une variable clé à prendre en compte dans les étapes de planification et de construction d'une nouvelle canalisation. Il souligne l'importance de prendre en compte non seulement le risque individuel mais aussi sociétal. L'ensemble de données utilisé dans l'article est basé sur des données au niveau européen.

Shahriar et al [18] ont mené une étude sur l'approche de l'évaluation de la durabilité à l'aide d'une analyse par nœud papillon floue dans les oléoducs et gazoducs, où la logique floue est utilisée pour dériver les probabilités des événements de base dans l'arbre des défaillances et estimer les probabilités des conséquences de l'événement.

Dans l'étude de Vianello et Maschio [19], une évaluation quantitative des risques du réseau de distribution de gaz italien a été effectuée. L'objectif principal de ce travail est d'analyser et d'évaluer le risque du réseau italien de distribution de gaz naturel à haute pression et d'expliquer la méthodologie d'évaluation quantitative des risques.

Quant à Pontiggia et Al [20], ils menèrent une autre recherche liée à l'évaluation des risques des gazoducs enfouis. L'article se concentre sur un nouveau réseau d'arbres d'événements et des conclusions sont tirées de l'évaluation des risques et les incertitudes associées dans la modélisation des accidents de pipeline.

Han et Weng [21], ont réalisé une étude comparative sur les méthodes de risque qualitatives et quantitatives pour le réseau de gazoducs urbains, où les méthodes qualitatives sont choisies à l'aide de plusieurs indices (sélection, classification, indice de risque, indice de

conséquence...), et les méthodes quantitatives consistent en une évaluation des probabilités, une analyse des conséquences et une évaluation des risques.

La méthode STPA (Systems-Theoretic Process Analysis) est une nouvelle méthode d'analyse des dangers basée sur la théorie des systèmes plutôt que sur la théorie de la fiabilité [22] dans le domaine de l'évaluation des risques et de l'analyse des risques. Elle a été utilisée comme méthode d'analyse qualitative des risques dans plusieurs travaux. Leveson et Al. [23], ont réalisé une étude comparative entre la méthode STPA et le processus d'évaluation de la sécurité du système de freinage de roue dans les avions, afin de fournir des preuves à l'appui de l'hypothèse qu'il y a un nouveau modèle de causalité des accidents, où les accidents sont causés par pannes de composants, conception du système (y compris les logiciels).

Dans les travaux de J. Zhang et al. [24], l'approche STPA est combinée à l'évaluation de la disponibilité, l'objectif de cette recherche est de placer une interface entre l'analyse STPA et RAM, où ils ont proposé une approche nommée STPA-RAM. D'autres ont utilisé la méthode STPA pour analyser et évaluer le risque de faisabilité en l'utilisant dans les applications de l'industrie des procédés ; ils l'ont également utilisé dans le cadre d'une étude comparative avec l'analyse HAZOP pour déterminer si la méthode STPA peut ou non remplacer la méthode HAZOP traditionnelle.

Sulaman et al [25] ont appliqué la méthode STPA sur un système socio-technique à trois contrôleurs. Ce sont des composants critiques du système car ils contiennent un modèle de processus. Le contrôleur reçoit des entrées de presque tous les composants du système, par exemple des capteurs et des actionneurs, puis il effectue des calculs internes pour émettre une commande. Toujours en 2017, Sulaman et al [26], ont réalisé une étude comparative entre la méthode STPA et AMDEC, en utilisant une méthodologie de recherche par étude de cas, pour comparer l'efficacité des méthodes et étudier les principales différences entre elles.

D'autres travaux montrent les limites et les améliorations du STPA pour la sûreté et la sécurité, Schmittner et al [27] ont appliqué STPA-Security à des cas d'utilisation du monde réel pour une analyse conjointe de la sûreté et de la sécurité, un système de gestion de batterie pour un véhicule hybride, ils ont observé plusieurs limitations de l'extension de sécurité. Ils proposent des améliorations pour répondre à ces limites pour une analyse combinée de la sûreté et de la sécurité. Leurs améliorations conduisent à une meilleure identification des scénarios de sécurité de haut niveau.

II.2. Méthodes d'analyse des risques :

L'identification des dangers se fait à travers plusieurs méthodes d'analyse des risques, qui peuvent être qualitatives, quantitatives. Ces méthodes sont généralement classées selon différentes approches :

- probabilistes ou déterministes
- inductives ou déductives

II.2.1. Classification

Dans l'étude de J. Texier [28], 62 méthodes d'analyse des risques dans les installations industrielles ont été répertoriées et classées selon différents critères, tel que :

- Par approches : qualitatives, probabilistes ... etc.

- Par étapes d'hierarchisation
- Domaine d'application : industries, transport ... etc.
- Selon les données collectées : processus, produits, probabilités/fréquences, management, environnement ... etc.

Le tableau II.1, ci-dessous, représente une classification de quelques méthodes d'analyses des risques selon les approches probabiliste/déterministe, qualitatives/quantitative

Tableau II.1 – classification de quelques méthodes d'analyses des risques [28]

Méthodes d'analyse des risques				
	N°	Qualitatives	N°	quantitatives
déterministe	1	Checklist	15	Dow's Chemical Exposure Index CEI
	2	Failure Mode Effect Analysis FMEA	16	Dow's Fire and Explosion Index FEI
	3	Hazard and Operability HAZOP	17	Fire and Explosion Damage Index FEDI
	4	Human Hazard and Operability HumanHAZOP	18	Hazard Identification and Ranking HIRA
	5	Optimal Hazard and Operability OptHAZOP	19	Methodology of domino effects analysis
	6	Preliminary Risks Analysis PRA	20	Toxic Damage Index TDI
	7	Task Analysis TA		
	8	What if? Analysis		
Probabilist	9	Accident Sequences Precursor ASP	21	Event Tree Analysis ETA
	10	Delphi Technique	22	Fault Tree Analysis FTA
	11	Earthquake safety of structures and installations in chemical industries	23	Maintenance Analysis MA
			24	Short Cut Risk Assessment SCRA
			25	Work Process Analysis Model WPAM
Déterministe & probabiliste	12	Reliability Block Diagram RBD	26	Failure Mode Effect Criticality Analysis FMECA
	13	Safety Analysis SA	27	Method Organised Systematic Analysis of Risk MOSAR
	14	Safety Culture Hazard and Operability SCHAZOP	28	Optimal Risk Assessment ORA
			29	Probabilistic Safety Analysis PSA
			30	Quantitative Risk Assessment QRA

II.2.1.1. Approche probabiliste

L'approche probabiliste fait intervenir le calcul de probabilités relatives à l'occurrence d'événements faisant partie du processus de matérialisation d'un scénario d'accident donné.

Il s'agit d'une approche complémentaire qui permet d'analyser le dispositif de défense en profondeur décidé à l'issue d'une approche purement déterministe, ceci a été le cas dans le domaine nucléaire ou les techniques probabilistes viennent appuyer l'approche déterministe.[29]

II.2.1.2. Approche déterministe

L'approche déterministe a généralement été adoptée dans les domaines à haut risque tels que nucléaire, militaire, transports guidés, où le moindre risque significatifs est traqué et réduit à la source.

Elle consiste à recenser les événements pouvant conduire à un scénario d'accident en recherchant le pire cas possible (The Worst Case) et en affectant une gravité extrême à ses conséquences potentielles. [29].

II.2.1.3. Démarche inductive

L'Induction, c'est une Manière de raisonner qui consiste à inférer une chose d'une autre, à généraliser à partir de cas singuliers, à aller des effets aux causes.

Le principe de ces méthodes consiste à partir d'une cause d'anomalie (défaillance, erreur humaine, agression externe, etc.) et à déterminer les scénarios d'évènements qui en résultent et/ou l'ensemble de ses conséquences possibles. [30]

II.2.1.4. Démarche déductive

La Déduction, c'est un Système de raisonnement où l'on tire des conséquences en partant d'un principe ou d'une hypothèse. C'est aussi une conséquence tirée d'un raisonnement. Les méthodes d'analyse déductive ont pour finalité la recherche des combinaisons de causes possibles d'un événement redouté. [31]

II.2.1.5. Méthodes quantitatives

Les analyses quantitatives sont supportées par des outils mathématiques ayant pour but d'évaluer la sûreté de fonctionnement et entre autres la sécurité. Cette évaluation peut se faire par des calculs de probabilités (par exemple lors de l'estimation quantitative de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté) ou bien par recours aux modèles différentiels probabilistes tels que les Chaines de Markov, les réseaux de pétri, etc [29].

Les analyses quantitatives ont de nombreux avantages car elles permettent :

- D'évaluer la probabilité des composantes de la sûreté de fonctionnement.
- De juger de l'acceptabilité des risques en intégrant les notions de périodicité des contrôles, la durée des situations dangereuses, la nature d'exposition, etc.
- D'apporter une aide précieuse pour mieux juger du besoin d'améliorer la sécurité.
- De hiérarchiser les risques.
- De chercher de meilleures coordination et concertation en matière de sécurité entre différents

II.2.1.6. Méthodes qualitatives

L'application des méthodes d'analyse de risque qualitatives fait systématiquement appel aux raisonnements par induction et par déduction. La plupart des méthodes revêtent un caractère inductif dans une optique de recherche allant des causes aux conséquences éventuelles. En contrepartie, il existe quelques méthodes déductives qui ont pour but de chercher les combinaisons de causes conduisant à des évènements redoutés. [32]

II.2.2. Exemples de méthodes d'analyses :

Nous présentons dans cette partie une brève description de quelques méthodes d'analyses des risques qu'on peut appliquer dans le secteur du TMD.

II.2.2.1. Analyse préliminaire des risques (APR)

L'analyse préliminaire des risques est une méthode d'analyse inductive simple, d'usage très général couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. Elle peut également être utile pour analyser des systèmes existants pour classer les dangers et les risques par priorité pour une analyse plus approfondie ou lorsque les circonstances ne permettent pas l'utilisation d'une technique plus poussée. [33]

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

- des substances ou préparations dangereuses, que ce soit sous forme de matières premières, de produits finis, d'utilités...,
- des équipements dangereux comme par exemple des stockages, zones de réception/expédition, réacteurs, fournitures d'utilités (chaudière...),
- des opérations dangereuses associées au procédé.

A partir de ces éléments dangereux, l'APR vise à identifier, pour un élément dangereux, une ou plusieurs situations de dangers.

Le tableau II.2, ci-dessous est donc donné à titre d'exemple

Tableau II.2 – Exemple de tableau type « APR » [33]

Fonction ou système :						Date :	
1	2	3	4	5	6	7	8
N°	Produit ou équipement	Situation de danger	Causes	Conséquences	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	observations

Limites et avantages

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations. Elle apparaît comme relativement économique en termes de temps et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé

Les avantages sont les suivants :

- peut être utilisée lorsque les informations sont limitées ;
- permet d'anticiper les risques très tôt dans le cycle de vie du système.

Les limites sont les suivantes :

- elle n'offre que des informations préliminaires. Elle n'est pas exhaustive ni ne donne des informations détaillées relatives aux risques et à la manière dont il est possible de les éviter au mieux.

II.2.2.2. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) et Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)

L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) est une technique permettant d'identifier dans quelles mesures les composants, les systèmes ou les processus peuvent tomber en panne pour exécuter la conception prévue. [34]

L'AMDE permet d'identifier :

- Tous les modes de défaillance potentiels des différentes parties d'un système (un mode de défaillance est l'observation d'une panne ou de ce qui ne fonctionne pas correctement) ;
- les effets que ces défaillances peuvent avoir sur le système ;
- les causes de la défaillance ;
- la manière d'éviter les défaillances et/ou de limiter leurs effets sur le système.

Il existe plusieurs types de méthode AMDE :

- l'AMDE Conception (ou produit), qui est utilisée pour les composants et les produits ;
- l'AMDE Système utilisée pour les systèmes ;
- l'AMDE Processus utilisée pour les processus de fabrication et d'assemblage ;
- l'AMDE Service ;
- l'AMDE Logiciel.

La méthode AMDEC développe une AMDE de sorte que chaque mode de défaillance identifié soit classé conformément à son importance ou criticité.

D'une manière générale, il s'agit d'une analyse qualitative ou semi-quantitative, mais qui peut être quantifiée à l'aide des taux de défaillance actuels. Le tableau II.3 présente un exemple de tableau pour la méthode AMDEC

Tableau II.3 – Exemple de tableau type « AMDEC » [33]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Equipement	Fonction	Mode de défaillance	Causes de défaillances	Effet local	Effet final	moyens de détection	Moyens/mesures de sécurité	P	G	recommandation

Les analyses AMDE/AMDEC présentent certains avantages et limites [35], tel que :

- elles s'appliquent largement aux modes de défaillance humaine, d'équipements et de systèmes ainsi qu'aux matériels, logiciels et procédures ;
- elles permettent d'éviter les modifications onéreuses de l'équipement en service par une identification précoce des problèmes dans le processus de conception ;
- elles permettent d'identifier les modes de défaillance localisée et les exigences pour les systèmes redondants et de sécurité.

Les limites sont les suivantes :

- elles peuvent uniquement être utilisées pour identifier les modes de défaillance localisée, et pas les combinaisons de modes de défaillance ;
- si les études ne sont pas convenablement contrôlées et mises au point, elles peuvent prendre du temps et être onéreuses.

II.2.2.3. HAZard and OPerability (Hazop)

L'étude HAZOP s'attache à l'identification des déviations potentielles, en se reposant sur l'utilisation de mots-guides permettant de déterminer dans quelle mesure il n'est pas possible d'obtenir la conception ou les conditions de fonctionnement désirées à chaque étape de la conception, du processus, du mode opératoire ou du système. D'une manière générale, elle est mise en place par une équipe pluridisciplinaire à la suite de plusieurs réunions. La méthode est particulièrement adaptée aux systèmes complexes de type thermo-hydrauliques (pour lesquels il est primordial de maîtriser des paramètres comme la pression, la température, le débit...), rencontrés sur des sites industriels mettant en jeu des produits ou/et des procédés dangereux et entraînant des conséquences immédiates graves pour le personnel, la population, les biens et l'environnement. Son domaine d'application comprend les procédés et les processus dans des secteurs aussi divers que la chimie, la pétrochimie, le pétrole, l'hydraulique, le nucléaire, l'industrie alimentaire et les transports. [35]

La méthode consiste à décomposer le système considéré en sous-ensembles, appelés « nœuds », puis à l'aide de mots clés, ou mots guides, spécifiques à la méthode, faire varier les paramètres du système par rapport à ses points de consignes. Elle suit une procédure assez semblable à celle proposée par l'AMDE. L'HAZOP ne considère plus des modes de défaillances mais les dérives potentielles (ou déviations) des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation. [33]

La génération (conceptuelle) des dérives est effectuée de manière systématique par la conjonction :

- de **mot-clé** comme par exemple « Pas de », « Plus de », « Moins de », « Trop de »
- des **paramètres** associés au système étudié. Des paramètres couramment rencontrés concernent la température, la pression, le débit, la concentration, mais également le temps ou des opérations à effectuer.

Mot-clé + Paramètre = Dérive

Les résultats de l'étude HAZOP sont résumés dans un tableau. Le tableau II.4 représente un exemple de tableau HAZOP.

Tableau II.4 – Exemple de tableau type « HAZOP » [33]

Date :								
Ligne ou équipement :								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
N°	Mot-clé	Paramètre	Causes	Conséquences	Détection	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	observations

Avantages et limites

L'HAZOP est un outil particulièrement efficace pour les systèmes thermo-hydrauliques. Cette méthode présente tout comme l'AMDE un caractère systématique et méthodique. Considérant, de plus, simplement les dérives de paramètres de fonctionnement du système,

En revanche, l'HAZOP permet difficilement d'analyser les événements résultant de la combinaison simultanée de plusieurs défaillances. Par ailleurs, il est parfois difficile d'affecter un mot clé à une portion bien délimitée du système à étudier. Cela complique singulièrement l'identification exhaustive des causes potentielles d'une dérive. Elle peut prendre beaucoup de temps et donc être onéreuse. [36]

II.2.2.4. la méthode « évaluation quantitative des risques » (QRA)

L'évaluation quantitative des risques est devenue largement utilisée dans plusieurs domaines industriels, où elle est considérée comme un outil d'aide à la prise de décision. Cinq éléments spécifiques y sont impliqués [37]:

- Identification des dangers pour déterminer les scénarios d'incident, les dangers et événements dangereux, leurs causes et leurs mécanismes.
- Analyse des conséquences pour déterminer l'ampleur des conséquences des événements dangereux identifiés.
- Estimation de fréquence pour déterminer la fréquence d'apparition des événements dangereux identifiés et les diverses conséquences.
- Résumé des risques pour déterminer les niveaux de risque.
- Évaluation des risques pour déterminer si le risque est tolérable / intolérable et identifier les mesures d'atténuation des risques et hiérarchiser celles-ci en utilisant des techniques tels que le classement des risques et l'analyse coûts-avantages. Modélisation

La figure II.1 résume les principales étapes de la méthode QRA :

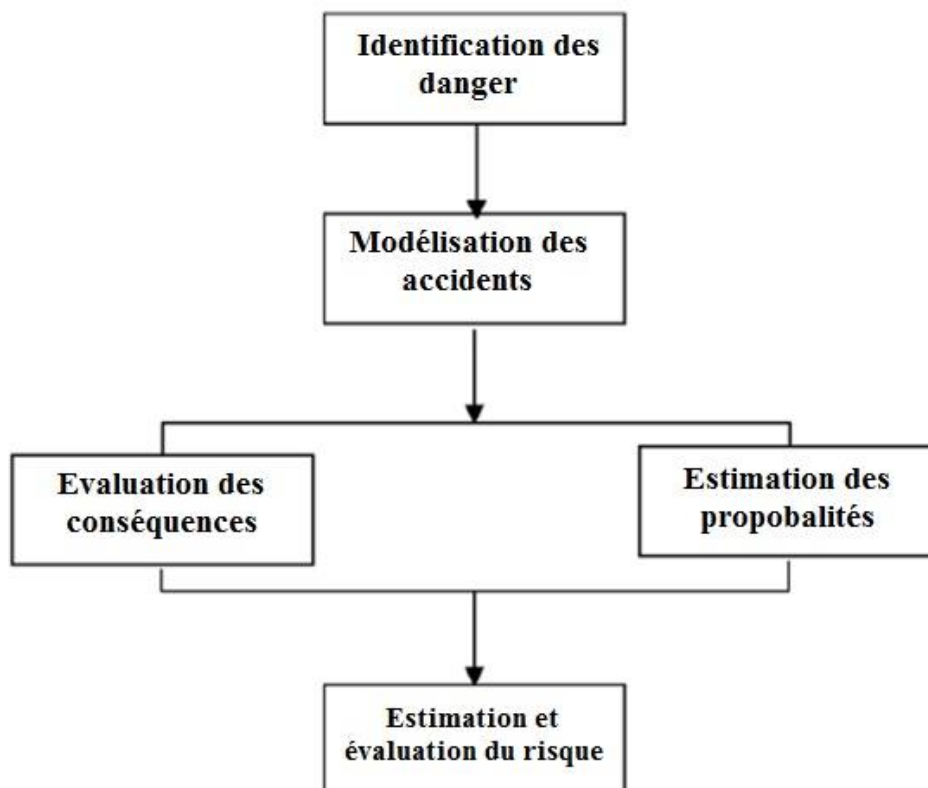


Figure II.1. Étapes de la méthode QRA [38]

Le tableau II.5 ; ci-dessous ; liste quelques méthodes d'analyse des risques qu'on peut appliquer à chaque étape :

Tableau II.5 – Méthodes d'analyse des risques pouvant être utilisées dans la méthode QRA

1. Identification des dangers	2. Quantifications des conséquences	3. Quantification de la probabilité	4. Evaluation du risque
-what-if -audit de sécurité -checklist -brainstorming -APR -HAZOP -AMDE	-dispersion atmosphérique -modèle de radiation thermique	-historiques -ADD -ADE -analyse de la fiabilité humaine -ADC	-matrice de risque -courbes F/N -risque individuel -risque sociétal

II.2.2.5. Évaluation de la vulnérabilité dans les systèmes de transport (Vulnerability Assessment in Transportation Systems)

L'approche proposée pour une évaluation quantitative de la vulnérabilité prend racine dans les réflexions et les idées contenues dans la littérature scientifique, les documents officiels et les déclarations des organismes de réglementation nationaux et / ou internationaux des pays de référence tels que les États-Unis et l'UE.

La méthodologie suggérée suit le «diagramme générique d'évaluation de la vulnérabilité des systèmes complexes» introduit par le Département américain de l'énergie (USDoE) [39], il fournit les aspects méthodologiques servant de guide pour l'élaboration d'un modèle d'évaluation de la vulnérabilité. [40]

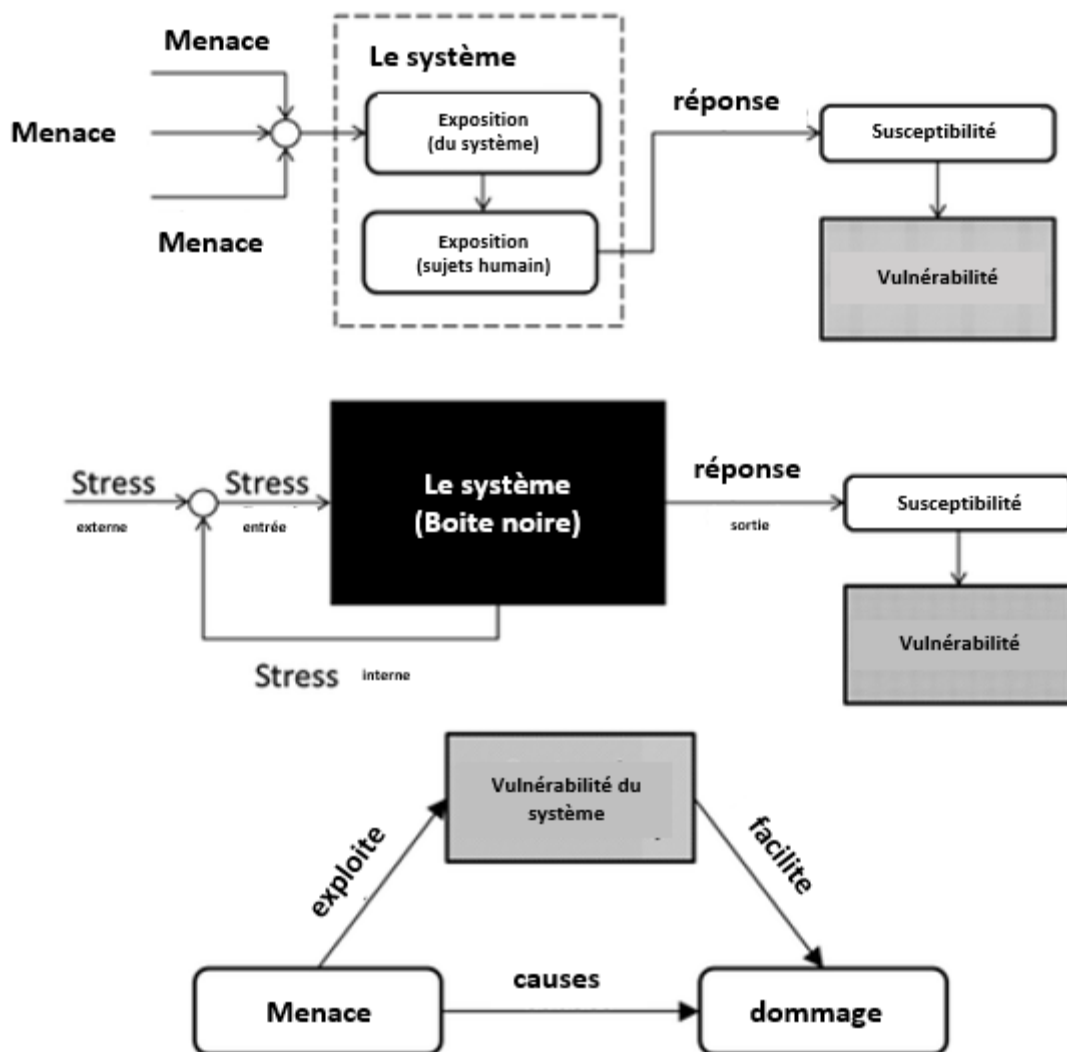


Figure II.2 . Différents modèles de l'approche par vulnérabilité [40]

Les modèles de vulnérabilité présentés, bien que non exhaustifs, donnent un aperçu des efforts visant à formaliser le concept de vulnérabilité. Ces modèles sont considérés comme complémentaires plutôt que contradictoires.

L'approche suivante est adoptée par Vamanu et Al. [41] pour l'évaluation de la vulnérabilité des systèmes de transport :

1. Description du système de transport par des indicateurs. Les indicateurs sont identifiés et définis analytiquement de manière à satisfaire les exigences génériques de définition des indicateurs, et à caractériser les éléments constitutifs du système de transport, et reflètent, de manière aussi réaliste que possible, les opérations d'interaction entre eux et avec d'autres systèmes.
2. Le segment de transport est divisé en points de mesure.
3. La vulnérabilité est évaluée à chaque point de mesure, en tenant compte des caractéristiques spatiales et environnementales particulières.
4. Après avoir «parcouru» et évalué l'ensemble du segment des transports, on obtient le profil de vulnérabilité du segment.
5. L'indice de vulnérabilité du segment est calculé à partir du profil de vulnérabilité.

6. Les indices de vulnérabilité des segments du transport contribuent à l'indice de vulnérabilité du système de transport.
7. L'évaluation d'un système se fait sur la base de l'environnement opérationnel du système qui est caractérisé par une zone circulaire avec un rayon de pertinence. Ce rayon représente la distance ou s'étend les effets de l'accident.
8. L'analyste définit les niveaux d'acceptabilité de la vulnérabilité en fonction de sa perception, de son système de croyance et / ou de ses objectifs. Ainsi, le système est placé dans l'une des trois catégories d'acceptabilité : vulnérabilité minimale, acceptable ou inacceptable.

II.3. Description de la méthodologie suivie

Le but principal de notre étude est de réaliser une identification des dangers et risques liés aux transports de matières dangereuses dans la région de Skikda. Pour concrétiser cela, nous optons pour la combinaison de plusieurs méthodes afin d'optimiser l'identification. La figure II.3, ci-dessous représente l'ordre d'application de chaque méthode.

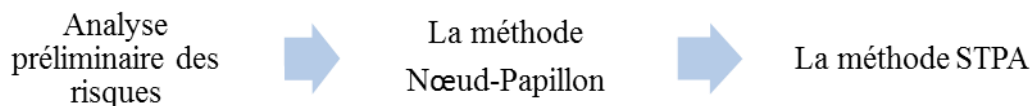


Figure II.3. Méthodologie appliquée

L'Analyse préliminaire des risques va nous permettre d'identifier de manière générale les causes possibles des phénomènes dangereux succédant un accident lié aux transports de matières dangereuses. Les conséquences de ces phénomènes sont également identifiées par cette analyse.

La méthode Nœud-Papillon, utilisée dans son aspect qualitative, nous permettra de réaliser une arborescence de causes, conséquences et phénomènes dangereux autour d'un événement redouté central, préalablement identifié dans l'APR.

Pour finir, nous appliquerons la méthode STPA, qui identifiera les dangers et les différents scénarios d'accidents liés aux logiciels de control et de sécurité du système étudié.

II.4. Méthodes d'analyse des risques retenus pour l'étude des risques liés aux TMD dans la région de Skikda

II.4.1. La méthode Nœud papillon

La méthode «nœud papillon» est un moyen schématique simple (une approche de type arborescente) permettant de décrire et d'analyser les chemins d'un risque en partant des causes jusqu'aux conséquences. Elle peut être considérée comme la combinaison d'un arbre de défaillance permettant d'analyser la cause d'un événement et d'un arbre d'événements permettant d'analyser les conséquences. Toutefois, le «nœud papillon» met l'accent sur les barrières qui séparent les causes et le risque, puis le risque et les conséquences. Les diagrammes «nœud papillon» peuvent être conçus à partir d'arbres de défaillance et

d'événement, mais ils sont le plus souvent élaborés directement à la suite d'une session de «brainstorming» [33].

La méthode «nœud papillon» est utilisée lorsque la situation ne garantit pas la complexité d'une analyse par arbre de panne complète ou que l'accent est essentiellement placé sur l'absence absolue de barrière ou de contrôle pour chaque vecteur de défaillance. Elle est utile lorsque les vecteurs menant à la défaillance sont clairs et indépendants.

Un «nœud papillon» est souvent plus facile à comprendre qu'un arbre de défaillance ou d'événements. De ce fait, il peut s'agir d'un bon outil de communication lorsque l'analyse est faite par des techniques plus complexes.

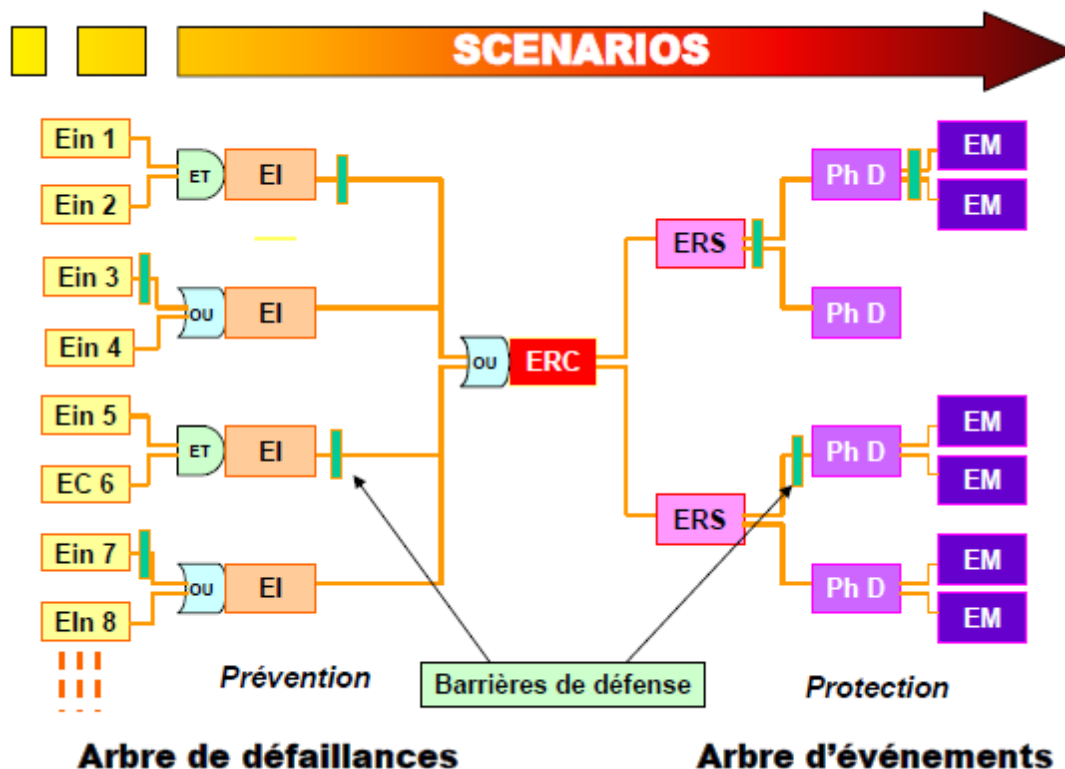


Figure II.4. Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon [42]

II.4.2. La méthode STPA (System-Theoretic Process Analysis)

La méthode STPA (System-Theoretic Process Analysis) est une analyse des dangers basée sur un modèle étendu de causalité des accidents. La méthode suppose que les accidents peuvent également être causés par des interactions dangereuses des composants du système [43]. Certains des avantages de la méthode STPA par rapport aux techniques traditionnelles d'analyse des dangers / risques sont :

- Des systèmes très complexes peuvent être analysés. Les «unknown unknowns» qui ne se trouvent que dans les opérations peuvent être identifiées tôt dans le processus de développement et éliminés ou atténués. Les fonctionnalités prévues et non souhaitées sont gérées.
- Elle peut être lancée au début de l'analyse de concept pour aider à identifier les exigences et les contraintes de sécurité. Ces contraintes peuvent ensuite être utilisées pour

concevoir la sûreté (et la sécurité) dans l'architecture et la conception du système, éliminant ainsi les retouches coûteuses impliquées lorsque des défauts de conception sont identifiés à la fin du développement ou pendant les opérations.

- Elle inclut les logiciels et les opérateurs humains dans l'analyse, garantissant que l'analyse des dangers inclut tous les facteurs causaux potentiels des pertes.
- Elle fournit une documentation sur les fonctionnalités du système qui sont souvent manquantes ou difficiles à trouver dans les grands systèmes complexes.

Les étapes de la méthode STPA de base sont illustrées dans la Figure II.5 avec une représentation graphique :

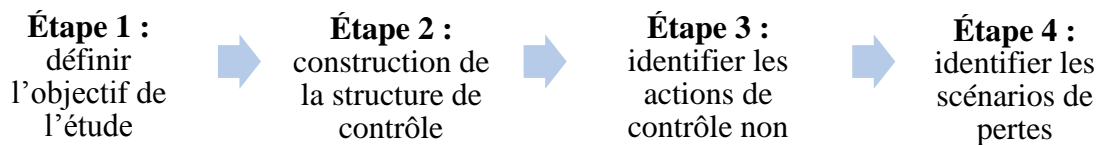


Figure II.5. Le diagramme des étapes de la STPA [43]

- La définition de l'objectif de l'analyse est la première étape de toute méthode d'analyse. Quels types de pertes, l'analyse visera-t-elle à éviter ? Quel est le système à analyser et quelle est la limite du système ?
- La deuxième étape consiste à construire un modèle du système appelé structure de contrôle. Une structure de contrôle capture les relations fonctionnelles et les interactions en modélisant le système comme un ensemble de boucles de contrôle de rétroaction.
- La troisième étape consiste à analyser les actions de contrôle dans la structure de contrôle pour examiner comment elles pourraient conduire aux pertes définies dans la première étape. Ces actions de contrôle non sécurisées sont utilisées pour créer des exigences fonctionnelles et des contraintes pour le système.
- La quatrième étape identifie les raisons pour lesquelles un contrôle non sécurisé peut se produire dans le système. Des scénarios sont créés pour expliquer :
 - Comment un feedback incorrecte, des exigences inadéquates, des erreurs de conception, des défaillances de composants et d'autres facteurs peuvent entraîner des actions de contrôle non sécurisées et finalement entraîner des pertes.
 - Comment des actions de contrôle sûres peuvent être fournies mais non suivies ou exécutées correctement, entraînant une perte.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'introduction d'un état de l'art sur les différentes études et analyses des risques réalisées dans le secteur du TMD, à l'explication des approches de classification des méthodes d'analyses des risques ainsi que quelques exemples de méthodes applicable dans le transports de matières dangereuses. Nous avons aussi expliqué la méthodologie qu'on va suivre pour réaliser notre analyses des risques liés aux transports de matières dangereuses dans la région de Skikda, cette partie constitue une introduction du chapitre 3 qui sera entièrement dédié à analyses des risques liés aux transports de matières dangereuses dans la région de Skikda.

Références bibliographique

- [1]. L. Citro, R.V. Gagliardi, Risk assessment of hydrocarbon release by pipeline. *Journal of Chem. Eng. Trans.*, 28 (2012), pp. 85-90
- [2]. Liu Liping, Yang Liangliang, Li Shuxia and Si Jiandong, 2013. The Risk Assessment Research of Hazardous Chemicals Rail and Truck Transportation. *Journal of Applied Sciences*, 13: 2077-2081.
- [3]. Saat, M. R., Werth, C. J., Schaeffer, D., Yoon, H., & Barkan, C. P. (2014). Environmental risk analysis of hazardous material rail transportation. *Journal of hazardous materials*, 264, 560-569.
- [4]. Gheorghe, A. V., Birchmeier, J., Kröger, W., & Vamanu, D. V. (2003). Hot spot based risk assessment for transportation dangerous goods by railway: Implementation within a software platform. In *Proceedings of the Third International Safety and Reliability Conference (KONBIN 2003)*. Gdynia, Poland.
- [5]. J. Yang, F. Li, J. Zhou, L. Zhang, L. Huang, J. Bi, A survey on hazardous materials accidents during road transport in China from 2000 to 2008, *J. Hazard. Mater.*, 184 (1–3) (2010), pp. 647-653
- [6]. Fabiano, B., Currò, F., Reverberi, A.P., and Pastorino, R. (2005) Dangerous goods transportation by road: from risk analysis to emergency planning. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 403 – 413
- [7]. Fabiano, B., Currò, F., Palazzi, E., & Pastorino, R. (2002). A framework for risk assessment and decision-making strategies in dangerous good transportation. *Journal of Hazardous Materials*, 93(1), 1–15. doi:10.1016/s0304-3894(02)00034-1
- [8]. Yafei Zhou, Guangyu Hu, Jianfeng Li, Chunyan Diao, Risk assessment along the gas pipelines and its application in urban planning. *Journal of Land Use Policy*, Volume 38, 2014, Pages 233-238, ISSN 0264-8377
- [9]. X.L. Guo, M. Verma, Choosing vehicle capacity to minimize risk for transporting flammable materials, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 23 (2) (2010), pp. 220-225
- [10]. M.W. Adler, J. van Ommeren, P. Rietveld, Road congestion and incident duration, *Economics of Transportation*, 2212-0122, 2 (4) (December 2013), pp. 109-118, 2013
- [11]. Amezaga, J.M., Ambituuni, A., Werner, D., 2015. Risk assessment of petroleum product transportation by road: A framework for regulatory improvement, *Safety Science*, Volume 79, November 2015, Pages 324-335, ISSN 0925-7535.
- [12]. Hong Yang, Kaan Ozbay, Kun Xie, 2014. Assessing the risk of secondary crashes on highways, *Journal of Safety Research*, Volume 49, June 2014, Pages 143.e1–149, ISSN 0022-4375.
- [13]. Kinateder, M., Gromer, D., Gast, P., Buld, S., Müller, M., Jost, M., Nehfischer, M., Mühlberger, A., Pauli, P., 2015. The effect of dangerous goods transporters on hazard perception and evacuation behavior – A virtual reality experiment on tunnel emergencies, *Fire Safety Journal*, Volume 78, November 2015, Pages 24–30, ISSN 0379-7112
- [14]. Verter, V. and Kara, B.H. (2001) A GIS - based framework for hazardous materials transport risk assessment. *Risk Analysis*, 21 (6), 1109 – 1120
- [15]. Brown, D.F. and Dunn, W.E. (2007) Application of a quantitative risk assessment method to emergency response planning. *Computers and Operations Research*, 34, 1243 – 1265
- [16]. Gheorghe, A.V., Birchmeier, J., Vamanu, D., Papazoglou, I., and Kröger, W. (2005) Comprehensive risk assessment for rail transportation of dangerous goods: a validated platform for decision support. *Reliability Engineering & System Safety*, 88 (2), 247 – 272

- [17]. Jo , Y. - D. and Ahn , B.J. (2005) A method of quantitative risk assessment for transmis-sion pipeline carrying natural gas . *Journal of Hazardous Materials* , A123 , 1 – 12
- [18]. A. Shahriar, R. Sadiq, S. Tesfamariam, Risk analysis for oil & gas pipelines: a sustainabil-ity assessment approach using fuzzy based Bowtie analysis. *J. Loss Prev. Process Ind.* 25(3), 505–523 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.12.007>
- [19]. C. Vianello, G. Maschio, Quantitative risk assessment of the Italian gas distribution net-work. *J. Loss Prev. Process Ind.* 32, 5– 17 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.07.004>
- [20]. 2M. Pontiggia, T. Vairo, B. Fabiano, Risk assessment of buried natural gas pipelines. Criti-cal aspects of event tree analysis. *Chem. Eng. Trans.* 77, 613–618 (2019)
- [21]. Z.Y. Han, W.G. Weng, Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *J. Hazard. Mater.* 189(1–2), 509–518 (2011)
- [22]. N.G. Leveson, C.H. Fleming, M. Spencer, J. Thomas, C. Wilkinson, Safety assessment of complex, software-intensive systems. *SAE Int. J. Aerosp.* 5(1), 233–244 (2012)
- [23]. N. Leveson, C. Wilkinson, C. Fleming, J. Thomas, I. Tracy, A comparison of STPA and the ARP 4761 safety assessment process, MIT PSAS Technical Report Rev. 1, October 2014
- [24]. J. Zhang, H. Kim, Y. Liu, M.A. Lundteigen, Combining system theoretic process analysis and availability assessment: a subsea case study. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab.* (2019). <https://doi.org/10.1177/1748006X18822224>
- [25]. S.M. Sulaman, T. Abbas, K. Wnuk, M. Ho`st, Hazard analysis of collision avoidance sys-tem using STPA, in *International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM)* (2014), pp. 424–428
- [26]. S.M. Sulaman, A. Beer, M. Felderer et al., Comparison of the FMEA and STPA safety analysis methods—a case study. *Softw. Qual. J.* (2017). <https://doi.org/10.1007/s11219-017-9396-0>
- [27]. C. Schmittner, Z. Ma, P. Puschner, Limitation and improvement of STPA-Sec for safety and security co-analysis, in *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security* (Springer, Cham, September 2016), pp. 195–209
- [28]. Jérôme Tixier, Gilles Dusserre, Olivier Salvi, Didier Gaston. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, 2002, 15 (4), pp.291-303. 10.1016/S0950-4230(02)00008-6. ineris-00961858
- [29]. Mohamed Habib Mazouni. Pour une meilleure approche du management des risques: de la modélisation ontologique du processus accidentel au système interactif d'aide à la décision. *Automatique /Robotique*. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2008. Français. fftel-00338938v1
- [30]. RE. Aéro 701 11. Recommandations pour les études de l'industrie aérospatiale - Guide des méthodes courantes d'analyse de la sécurité d'un système missile ou spatial. Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace (BNAE). (Novembre 1986).
- [31]. Laurence Gardes. Méthodologie d'analyse des dysfonctionnements des systèmes pour une meilleure maîtrise des risques industriels dans les PME : application au secteur du traitement de surface. *Sciences de l'environnement*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; INSA de Lyon, 2001. France
- [32]. Manteau, M., & Favaro, M.. Bilan des méthodes d'analyse à priori des risques. 2ème partie : principales méthodes de la sécurité des systèmes. INRS, Cahiers de Notes Documentaires de l'INRS, 139, pp. 363-389, 1990.

- [33]. INERIS DRA-2006-P46055-CL47569, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35), Ω -7 Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle, INERIS, 2006
- [34]. CEI 60812, Techniques d'analyse de la fiabilité du système – Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), 2006
- [35]. ISO 31010, Norme européenne NF EN 31010, Gestion des risques - Techniques d'évaluation des risques, Juillet 2010
- [36]. CEI 61882, Études de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) – Guide d'application, 2001
- [37]. Guideline for quantitative risk assessment 'Purple book', CPR 18E, The Netherlands Organisation of applied Scientific Research (2005)
- [38]. Fauquet-Alekhine, P. (2015). Risk Assessment for Subjective Evidence-Based Ethnography Applied in High Risk Environment. *Advances in Research*, 6(2), 1-13. <https://doi.org/10.9734/AIR/2016/21597>
- [39]. USDoE. (2001). Vulnerability assessment and survey program: Overview of assessment methodology (p. 15). Washington, DC: U.S. Department of Energy—Office of Energy Assurance. <https://hssl.org/?view&doc=140176&coll=limited>
- [40]. Gheorghe, A. V., & Vamanu, B. I. (2006a). Risk and vulnerability of transport critical infrastructure: A system of system engineering solution. In 4th EAPC/PfP Workshop on Critical Infrastructure Protection and Civil Emergency Planning: Building Bridges between Stake-holders to Mitigate Disasters. Zurich, Switzerland.
- [41]. Vamanu B.I., Gheorghe A.V., Katina P.F. The Vulnerability Issue. In: *Critical Infrastructures: Risk and Vulnerability Assessment in Transportation of Dangerous Goods*. Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality, vol 31. Springer, Cham (2016)
- [42]. Guide de pratique professionnelle, Travail de l'ingénieur > Gestion des risques > La représentation des résultats par l'approche nœud papillon, Ordre des ingénieurs du Québec, décembre 2014. <http://gpp.oiq.qc.ca>
- [43]. N. Leveson, J. Thomas, STPA Handbook MIT, Cambridge, 2018

Chapitre III

*Analyse des risques
liés aux transports de
matières dangereuses
dans la région de Skikda*

Introduction

Dans la région de Skikda, plusieurs entreprises opèrent dans le secteur du transport de matières dangereuses, en utilisant différents modes de transport. Dans ce chapitre, un recensement des entreprises activant dans ce secteur a été établi ; ce qui nous a conduit à classifier les différentes matières dangereuses transportées dans cette région, en fonction de leurs mode de transport, leurs état physique et leurs itinéraires. La deuxième partie de ce chapitre portera sur une analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses par canalisation dans la région de Skikda en utilisant une combinaison de méthodes d'analyses, et ce sera conclu par une étude comparative.

III.1. Le transport de matières dangereuses dans la Région de Skikda

III.1.1. Activités de transport de matières dangereuses dans la région de Skikda

La région de Skikda grâce à son complexe pétrochimique et son port est caractérisée par une importante activité de transport de marchandise y compris celle de matières dangereuses et notamment les dérivés pétroliers.

La collecte de données dans le complexe pétrochimique de Skikda, a permis de dresser une liste de quelques entreprises qui assurent la production et le transport de matières dangereuse, dans la région de Skikda et vers d'autres régions de l'est de l'Algérie ; à travers plusieurs mode de transports, ces résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Le tableau III.1, présente une brève description des entreprises exerçant une activité de TMD dans la région de Skikda, les matières dangereuses transportées et leurs modes de transports.

Tableau III.1 – Activités de transport de matières dangereuses dans la région de Skikda

Entreprise	Matières dangereuses	Mode de transport	Destination
<u>LindeGas groupe – Skikda</u> L'unité de Skikda Linde Gas Algérie dispose d'une unité de transformation et de production de gaz au niveau de la plate-forme industrielle de Skikda. Cette unité produit de l'oxygène, de l'azote, de l'argon, de l'hydrogène et de l'anhydride carbonique. Elle assure aussi le conditionnement de ces produits et leur commercialisation à travers le territoire national et l'export. Ces produits sont demandés par les industries pétrolières avoisinantes, l'industrie alimentaire, le secteur sanitaire, les centres de recherche et universités, les collectivités locales les artisans et le ministère de la défense etc. [1]	O2 : oxygène liquide réfrigéré	Route Camion-citerne / bouteille à gaz	Est de l'Algérie
	Co2 : dioxyde de carbone liquide réfrigéré	Route Camion-citerne	
	Ar : argon liquide réfrigéré	Route Camion-citerne Route	
	H2 : hydrogène	cadres d'H2	
	N2 : azote liquide réfrigéré	Route Camion-citerne	
<u>Région de transport Est – RTE</u> La région de Skikda assure le transport du pétrole brut, condensât	Le brut : pétrole Condensât Gaz naturel	Canalisation	Hassi r'mel – RTE Skikda

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

et gaz naturel, ainsi que leurs stockage, en provenance de Haoud El Hamra et Hass iR'Mel et les acheminement vers les terminaux arrivées oléoduc (NK1, OK1) et gazoduc (GK1, GK2, GK3) à Skikda. [2]			
Ra2K Le complexe topping condensat de Skikda (baptisé RA2K) a pour mission de traiter le condensat provenant des champs pétroliers algériens en vue de produire le naphta, le kérosène, le gasoil léger, le gasoil lourd et le butane. La capacité de traitement est de 5.000.000 t/an (pendant une période continue de fonctionnement de 330 jours). [3]	Condensât Naphta Kérosène Gasoil lourd Gasoil léger Butane	Canalisation	Ra2k – Ra1K
Naftal (ferroviaire) Le transport par voie ferroviaire dans la région de Skikda, pour le carburant (NAFTAL), comporte environ 146 km de voie singulière et 39 km de voie double, avec 15 gares. Allant du centre de stockage de carburant Skikda vers : Berahal (Annaba) et Souk Ahras. Avec une moyenne de 32 wagons -citernes par jour, ce qui vaut environ 13767 m3/semaine. [4]	Essence Diesel GPL	Voie ferroviaire	Beralhal (Annaba) Souk Ahras
Naftal CBR (canalisation) L'unité de canalisation Skikda de la société NAFTAL assure le transport et l'approvisionnement du Gasoil et Essence, sur la ville de Skikda, BERRAHAL (ANNABA), KHROUB (CONSTANTINE), à travers 03 différentes canalisations qui ont pour départ Ra1K. [5]	Essence gasoil	Canalisation	Ra1K-depots Skikda Ra1K-depots KHROUB Ra1K-depots BERRAHAL
Naftal gaz (unité à l'arrêt) La Société Nationale de commercialisation et de distribution des produits pétroliers – (NAFTAL – branche GPL) exploite depuis 1961 un Centre emplisseur GPL, situé sur la zone industrielle de Skikda (CE 211). L'activité du site consiste à conditionner, stocker et	Propane Butane	Route Camion-citerne/ bouteille à gaz Route Camion-citerne	

CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans la région de Skikda

distribuer de GPL (bouteilles & Vrac). Actuellement l'unité est à l'arrêt suite à un accident. [6]			
--	--	--	--





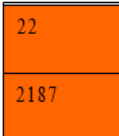


III.1.2. Classification des matières dangereuses transportées dans la région de Skikda :

Les matières dangereuses recensées ont fait l'objet d'une classification, selon le *Décret exécutif N°90-79 du 27 février 1990 portant la réglementation du transport de matières dangereuses*.




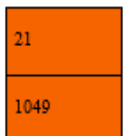

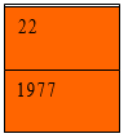


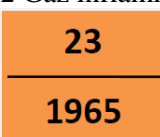

Le classement des matières dangereuses en Algérie a été établi en fonction de leurs caractéristiques propres ainsi que la nature des dangers qu'elles présentent.

Le tableau III.2, introduit une classification des différentes matières dangereuses transportées dans la région de Skikda.


Tableau III.2 – classification des matières dangereuses transportées dans la région de Skikda

Matière dangereuse	Mode de transport	Classification	Caractéristiques des canalisations	Itinéraire
<i>O2 : oxygène liquide réfrigéré</i>	Route Camion-citerne / bouteille à gaz	2.2 Gaz non inflammables et toxiques 5.1 Matières comburantes    	/	Région de l'est
<i>Co2 : dioxyde de carbone liquide réfrigéré</i>	Route Camion-citerne	2.2 Gaz non inflammables toxiques   	/	//
<i>Ar : argon liquide réfrigéré</i>	Route Camion-citerne	2.2 Gaz non inflammables toxiques	/	//

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

		  		
<i>H2 : hydrogène</i>	Route cadres d'H2	2.1. Gaz inflammables  	/	//
<i>N2 : azote liquide réfrigéré</i>	Route Camion-citerne	2.2 Gaz non inflammables toxiques   	/	//
<i>Le brut : pétrole</i>	Canalisation	3. liquide inflammable	OK.1 34'' : 645 KM (dont 109 km sur Skikda)	Hassi r'mel – RTE Skikda
<i>Condensât</i>	Canalisation	3. liquide inflammable	NK1 30'' : 645.5 KM (dont 40.880 km sur Skikda)	//
<i>Gaz naturel</i>	Canalisation	2. Gaz inflammables	GK1 40'' : 574.87 KM. (dont 41 km sur Skikda) GK2 42'' : 575,545 KM (dont 40.879 km sur Skikda) GK3 48'' : 785 KM (dont 55.198 km sur Skikda)	//
<i>Propane</i>	Route Camion-citerne / bouteille à gaz	2 Gaz inflammable  	/	Skikda – unité à l'arrêt
<i>Butane</i>	Route	2 Gaz inflammable	/	//

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

	Camion-citerne	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> 23 <hr/> 1965 </div> 		
<i>Condensât</i>	Canalisation	3. liquide inflammable	24''	RTE – Ra2K
<i>Naphta</i>	Canalisation	3 Liquide inflammable	24''	Ra2k – Ra1K
<i>Kérosène</i>	Canalisation	3 Liquide inflammable	10''	//
<i>Gasoil lourd</i>	Canalisation	3 Liquide inflammable	10''	//
<i>Gasoil léger</i>	Canalisation	3 Liquide inflammable	4''	//
<i>Butane</i>	Canalisation	2 Gaz inflammable	6''	//
Essence gasoil	Canalisation	3 Liquide inflammable	10'' : 6,979 km 12'' : 6,885 km	Ra1K- depots Skikda
Multi produit (Essence/gasoi)	Canalisation	3 Liquide inflammable	12 '' : 103,337 km	Ra1K- depots KHROUB
Multi produit (Essence/gasoi)	Canalisation	3 Liquide inflammable	12 '' : 81,245 km	Ra1K- depots BERRAH AL

III.1.3. Transport de matières dangereuses par voie Ferroviaire dans la région de Skikda

Le plus souvent le transport de matières dangereuses est assuré par le mode de transport routier ou par canalisation, surtout pour assurer les liaisons de longues distances. On reconnaît la région de Skikda est caractérisé par une importante activité de matières dangereuses spécialement les hydrocarbures et leurs dérivés. Ainsi, on peut noter qu'en plus du transport routier de carburants, le transport par voie ferroviaire est aussi présent. Ce dernier fait l'objet de nombreux accidents notamment dans la commune d'EL HARROUCH et d'AZZABA.

III.1.3.1. Description des chemins de fer sur la région de Skikda :

Le transport par voie ferroviaire dans la région de Skikda, pour le carburant (NAFTAL), comporte environ 146 km de voie singulière et 39 Km de voie double, avec 15 gares. Allant du centre de stockage de carburant Skikda vers : BERAHALL (Annaba) et Souk Ahras. Avec une moyenne de 32 wagons -citerne par jour, ce qui vaut environ 13767 m³/semaine [4].

III.1.3.2. Historique des accidents liés aux transports de matières dangereuses par voie ferroviaire dans la région de Skikda :

La région de Skikda connaît de nombreux accidents liés aux transports de matières dangereuses par voie ferroviaire, notamment le transport de gasoil et diesel, le tableau III.3, ci-dessous résume des accidents survenus sur la période de 2003-2017 dans la région de Skikda [4] :

Tableau III.3 – historique des accidents liés aux transports de matières dangereuses par voie ferroviaires dans la région de Skikda sur la période 2003-2017[4]

<i>Date</i>	<i>Lieu</i>	<i>Description des dégâts</i>
21/07/2003 11h50	RAMDANE DJAMEL	Incendie de 11 wagons-citernes du train alimenté en carburant et la destruction d'environ 600 000 litres de carburant, l'incinération de vergers et d'oliviers adjacents à la voie ferrée d'un diamètre de 600 mètres. Environ 500 mètres de la route et environ 100 mètres de la voie ferrée ont été endommagés.
27/11/2006 13h02	DIYAR ELZAYTOUN - (AZZABA)	une déviation d'un train transportant des marchandises et du carburant, où environ 420000 litres de carburant s'écoulent dans la commune de DIAR ELZAYTOUN. Le crash de 07 citernes a détruit la voie ferrée sur une longueur de 800 m, et a causé la mort d'une personne (01) et a blessé (06) autres.
27/04/2008 15h49	RAMDANE DJAMEL (PONT EL-FORSAN)	Déviation de 12 wagons-citernes du train chargé de carburant provenant du chemin de fer (60000 litres par réservoir) 02 réservoirs d'essence et le reste du gasoil.
14/05/2008 15h01	Centre de stockage et distribution du carburant - NAFTAL	incendie de 02 wagons-citernes lors du remplissage de la quantité de 100 000 l de diesel, blessant 04 personnes (brûlures mineures)
27/04/2010	Gare de RAMDANE DJAMEL	Déviation d'un train pour le transport de carburant (gare de Skikda - Constantine), renversement de 03 réservoirs (60000 litres), fuite de 88 m ³ de diesel, récupération de 32 m ³ de carburant diesel
13/02/2012 18h29	AIN BOUZIANE AL-HAROUCHE SALIH BOUCHAOUR	- La séparation de 4 wagons-citernes sur 8 remplis de carburant d'un train pour transporter le carburant de Skikda à Constantine. - Un wagon-citerne de capacité de 65 000 L s'est renversé près de la gare d'Ain-Bouziiane et a déversé environ 55 000 litres de carburant diesel - Le renversement de 2 wagons-citernes, d'une capacité de 65 000 litres à AL-HAROUCHE, et

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

		une fuite d'environ 67 000 litres de diesel. - Un wagon-citerne de 45 000 L s'est arrêté à l'endroit appelé AL-TANBOUR (SALIH BOUCHAOUR)
29/02/2012 00h20	SKIKDA	Déviation d'un wagon-citerne d'un train transportant de l'essence chargée de benzène d'une capacité de 45 mille litres dans gare routière Mohamed Boudiaf à 1.550 km. Le train se compose de 14 réservoirs remplis de diesel
21/10/2012 20h06	EL-SAFSAF (HAMMADI KROUMA)	Renversement de 03 wagons-citernes chargés de diesel et d'essence de 65 000 litres, la quantité de carburant perdue est d'environ 75 000 litres de diesel et 7 000 litres d'essence. Et le renversement de 2 camions chargés de blé, chemin de fer endommagé sur environ 100 mètres de long
24/07/2013 21h09	EL-ZAOUIYA (AZZABA)	déviation d'un train à carburant, constitués de 16 wagons-citernes à l'endroit nommé EL-ZAOUIYA, fuite totale des 10 wagons-citernes de carburant (60 m ³ /réservoir) vers la vallée, 06 sur la piste dont 03 remplie de diesel et de 01 essence et 02 Vide, le train se dirigeait de Skikda vers EL HAJJAR
14/08/2013 00h57	AL-HAROUCHE	Renversement d'un train de marchandises composé de 10 wagons, 06 chariots à blé (60 tonnes par chariot), 04 chariots à carburant (60 m ³ /réservoir). Six personnes ont été blessées. 06 wagons pour le transport du blé et 04 wagons-citernes pour le carburant diesel ont été détruits et environ 30 mètres de la voie ferrée et une partie du pont ont été détruits
09/09/2013 13h38	HAMMADI KROUMA	Déviation de 05 wagons-citernes dont la fuite de deux réservoirs (02) d'essence récupération d'environ 86000 l d'essence et 90000 l de diesel
10/06/2013 10h44	passage de voie ferrée MEKASSA – BEKOUCHE LAKHADAR (ENDROIT NON SURVEILLE)	Un train pour transporter le carburant de BERAHAL à Skikda est entré en collision avec un véhicule de type VAC
31/12/2013 08h06	TARFAYA (CHARLO) – RAMDAN DJAMEL	Déviation d'un wagon-citerne remplie de carburant diesel d'une capacité de 60 000 L environ, Direction : Ramadan Jamal - municipalité de BERAHAL
05/10/2014 15h10	EL-SAFSAF point kilométré 11.200- (HAMMADI	Déviation d'un train transportant du carburant qui se compose d'une locomotive et d'un chariot de 01 colis et 15 réservoirs, avec capacité d'un seul réservoir de 65 m ³ carburant. Fuite d'un des

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

	KROUMA)	réservoirs dérivés et endommagement du rail sur environ 150 mètres.
09/09/2015 16h00	cité HOUCIN LAZOUAT -SIIKDA	Déviation d'un train transportant du carburant depuis le centre de conditionnement dans la petite zone industrielle en direction de la gare de train de Skikda. Le train se compose d'une locomotive et de 16 wagons-citernes, 08 citernes déviées du rail. Aucune fuite, endommagement d'environ 20 mètres de la voie ferrée
22/02/2017 21h43	AL-HAROUCHE Point kilométré 32.400	Déviation de 03 wagons-citernes pour le transport de carburant à partir de Skikda vers Biskra et Tougourt. La capacité de chaque réservoir est estimée à 7 000 litres pour le fioul et la quantité totale des trois réservoirs a été récupérée, à l'exception de la fuite d'environ 5 000 litres de diesel.

La figure III.1, ci-dessous, représente la cartographie des différents accidents liés au transport de matières dangereuse par voie ferroviaire ayant survenus entre 2003 et 2017.

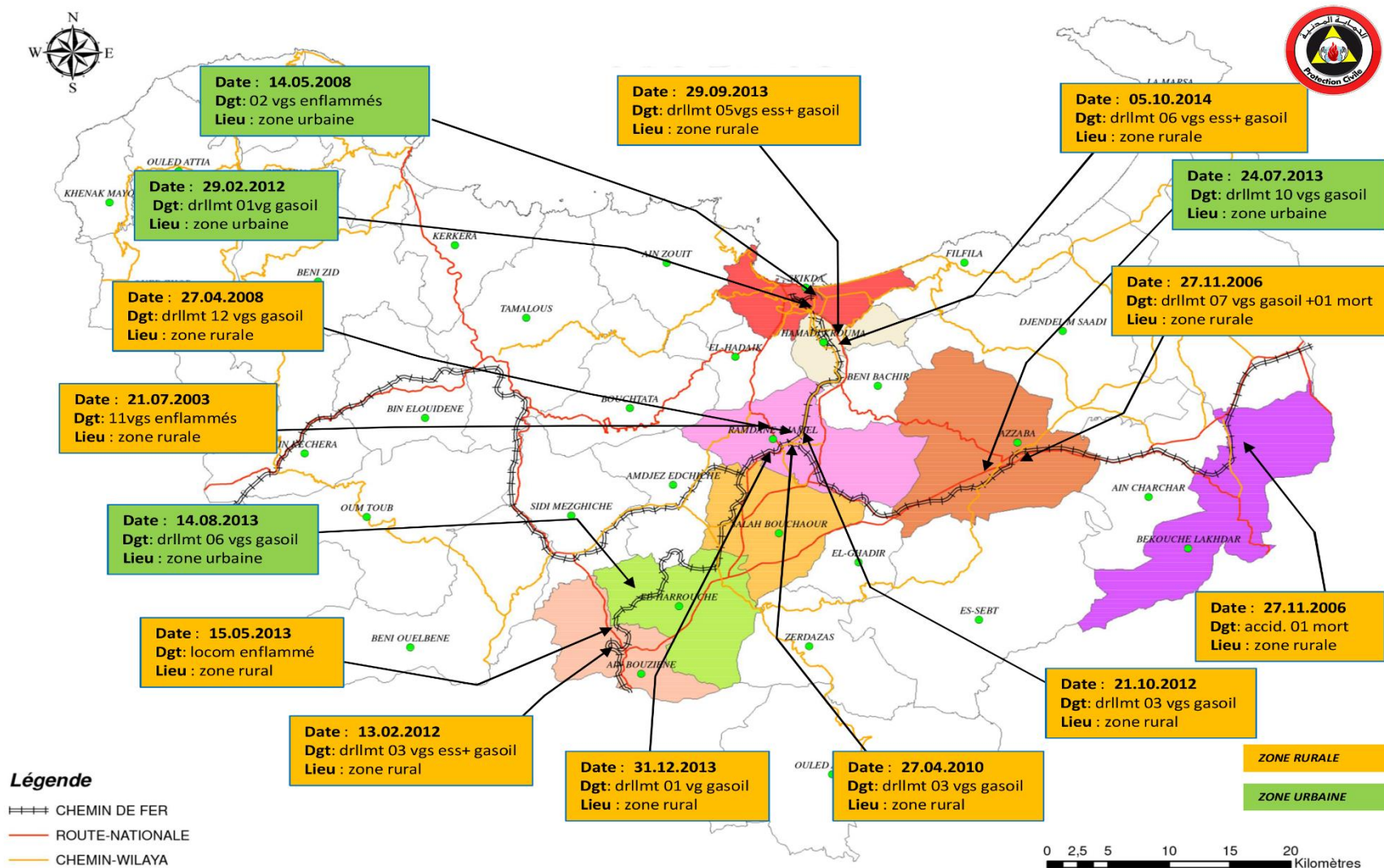


Figure III.1. Cartographie des accidents liés au transport de matières dangereuse par voie ferroviaire dans la région de Skikda [4]

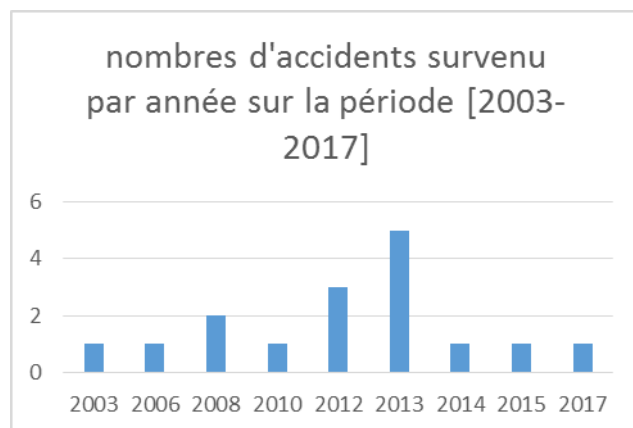
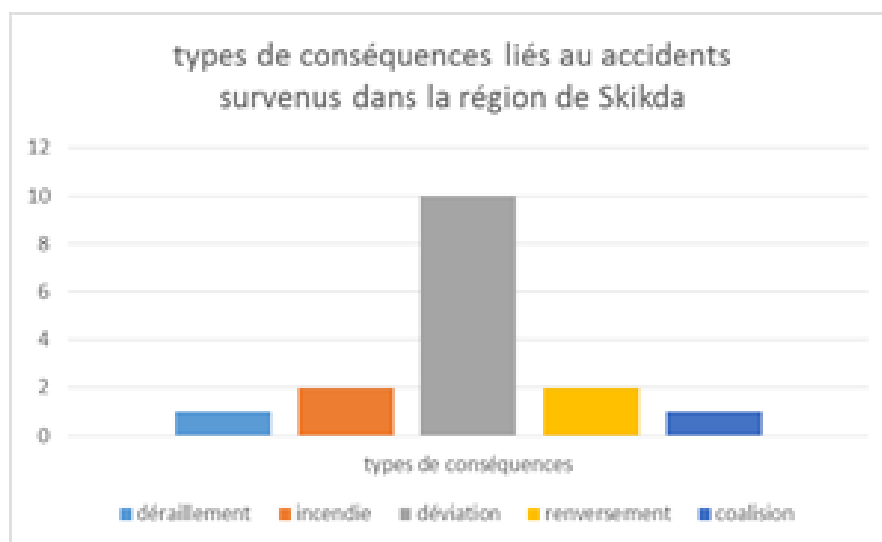


Figure III.2. Nombres d'accidents survenus par année sur la période [2003-2017]

La figure III.2 représente le nombre d'accidents par année sur la période de 2003-2017, on peut noter qu'en 2012 et 2013 il y a deux fois plus d'accidents que sur les autres années. On peut supposer que les pics peuvent être dus à des mauvaises conditions météorologiques ou bien le manque de formation des chauffeurs.



Graphique III.3. Types de conséquences liés aux accidents survenus dans la région de Skikda

La figure III.3 résume les différentes conséquences liées aux accidents de transport de carburants par voies ferroviaire, ces conséquences sont liées directement aux locomotives de trains ou les wagons-citernes. La déviation de train est la conséquence la plus courante.

III.1.4. Transport routier de matières dangereuses dans la région de Skikda

L'unité de Skikda Linde Gaz Algérie dispose d'une unité de transformation et de production de gaz au niveau de la plate-forme industrielle de Skikda. Cette unité produit de l'oxygène, de l'azote, de l'argon, de l'hydrogène et de l'anhydride carbonique. Elle assure aussi le conditionnement de ces produits et leur commercialisation à travers le territoire national et l'exportation. [1]

Ces produits sont demandés par les industries pétrolières avoisinantes, l'industrie alimentaire, le secteur sanitaire, les centres de recherche et universités, les collectivités locales les artisans et le ministère de la défense etc..

III.1.5. Transport de matières dangereuses par canalisation dans la région de Skikda

III.1.5.1. Région de transport Est – RTE :

L'activité principale du RTE consiste à transporter des hydrocarbures liquide et gazeux par canalisation et le tockage du pétrole brut et condensat.

Produits liquides transportés :

Le brut qui est envoyé par des turbopompes dans un oléoduc OK1 depuis la région de Haoud El Hamra vers le terminal, en passant par des stations de pompage. Une fois réceptionné et stocké dans des 14 réservoirs de 51200 m³ chacun dont 12 sont opérationnels, après une décantation de 24H à 48H, le contenu des bacs est expédié en grande partie (90%) vers la raffinerie et le port pétrolier de Skikda pour exportation [2].

Le condensât qui arrive au terminal à partir d'un oléoduc NK1 est stocké dans 04 réservoirs de 51200 m³, le contenu des bacs est expédié en grande partie vers le client principal topping condensat Ra2K [3].

Produits gazeux transportés :

Du centre national de dispatching gaz de Hassi R'mel via les gazoducs GK1, GK2, GK3 ; successivement comprimé dans des stations de compression. Reçu au terminal arrivée, le gaz subira une filtration préliminaire dans des séparateurs (06) pour être ensuite dirigé vers les vannes de régulation de pression et rampes de comptage ; Les principaux clients sont l'unité de liquéfaction et fractionnement du gaz naturel et la centrale thermique, tous les deux situées à l'intérieur de la zone industrielle de Skikda [2].

La région de Skikda assure le transport du pétrole brut, condensat et gaz naturel respectivement en provenance de Haoud El Hamra et Hassi R'Mel et les acheminent vers les terminaux arrivées oléoduc et gazoduc à Skikda.

III.1.5.2. Topping de Condensat Ra2K :

L'usine de Topping de Condensât reçoit du condensât en provenance du terminal RTE, par trois canalisations différents à un débit total d'environ 3000 m³/h, à une pression de 14,3 bars et une température de 10-35°C. Les lignes d'alimentation de condensat sont :

- 1) Ligne 28'' P349
- 2) Ligne 22''-P374
- 3) Ligne 22''-P373

Le Condensat des lignes mentionnées ci-dessus est transmis à une nouvelle ligne 24''. De cette ligne le condensât peut être envoyé dans les trois bacs de stockage du condensat. Grace à l'unité de traitement du condensat « l'unité 100 », le fractionnement du condensat nous permet d'avoir du : Naphta, Kérosène, Gasoil lourd (HGO), Gasoil léger (LGO) et du Butane [3].

Ces produits sont transférés depuis leurs bacs de stockage vers Ra1k à travers différentes canalisations.

III.1.5.3. NAFTAL : District carburants de Skikda- Unité canalisations de Skikda

L'unité de canalisation Skikda de la société NAFTAL assure le transport et l'approvisionnement du Gasoil et Essence, sur la ville de Skikda, BERRAHAL (ANNABA), KHROUB (CONSTANTINE), à travers 03 différentes canalisations qui ont pour départ Ra1K [5]. Les données relatives à ces canalisations sont regroupées dans le tableau III.4.

Tableau III.4 - présentation de quelques caractéristiques des canalisations de transport de gasoil et essence [7]

Itinéraire	Diam ø	Longueur	Produits	Nombre de poste de protection cathodique	Nombre de poste sectionnement
Ra1K- Dépôts SKIKDA	10 ''	6,979 km	Essences	03	/
Ra1K- Dépôts SKIKDA	12 ''	6,885 km	Gasoil	03	/
Ra1K- Dépôts BERRAHAL	12''	81,245 km	MULTI PRODUIT	04	07
Ra1K- Dépôts KHROUB	12''	103,337 km	MULTI PRODUIT	04	06

III.2. Présentation du cadre de l'étude

Notre étude concerne l'identification des dangers sur une canalisation de condensat. Le point de départ est HAUD EL HAMRA, et le point d'arrivée est le terminal d'arrivée Skikda, sur une distance de 645,5 KM [8]. La figure III.4 montre les différentes canalisations dans la région de Skikda. La figure III.5 présente la schématisation du système étudié [9] qui est le transport par canalisation du condensat :

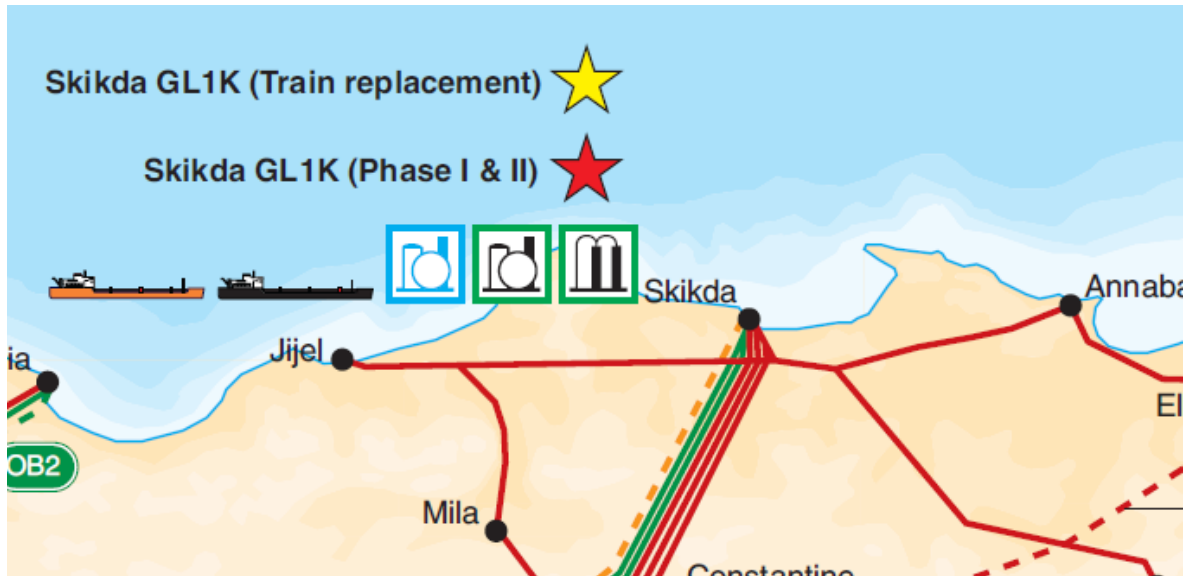


Figure III.4. Réseau de transport des hydrocarbures dans la région de Skikda [10]

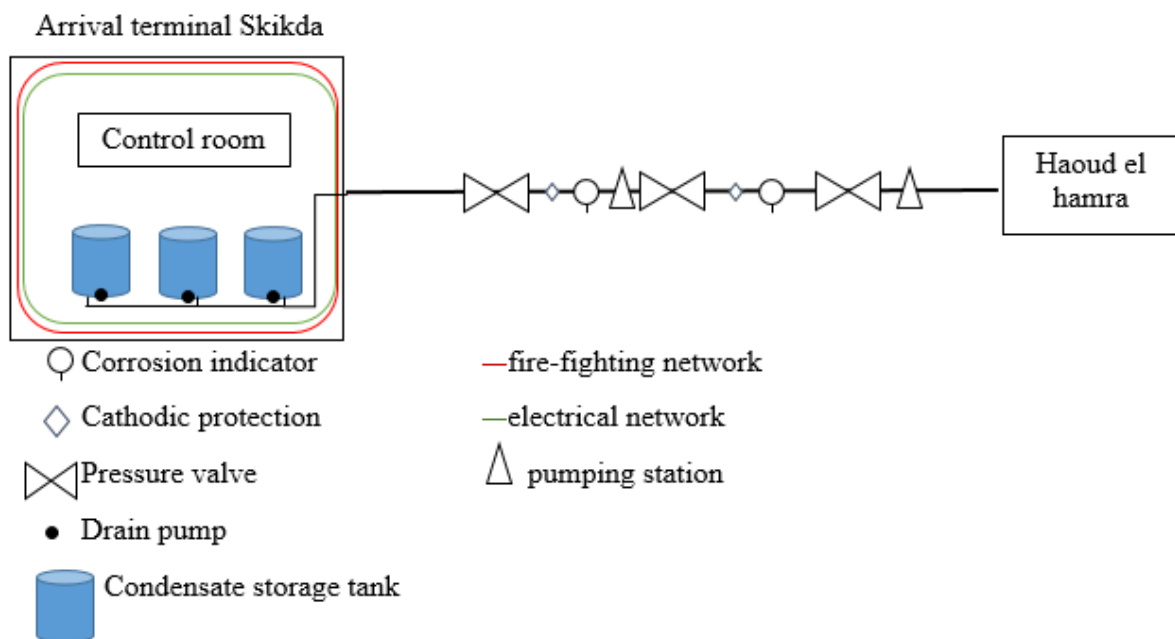


Figure III.5. Description du système de transport par canalisation de condensat

III.3. Analyse préliminaire des risques liés au transport de matières dangereuse par canalisation

Nous avons appliqué une analyse préliminaire des risques liés au transport par canalisation, afin de pouvoir déterminer les causes probables des accidents. Les résultats de cette analyse sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.5 - Analyse préliminaire des risques liés au transport par canalisation

Equipement	Cause		Conséquences	Phénomènes dangereux
Longue canalisation	Agression	externes : - actes de malveillance - phénomènes naturels (séisme/ glissement de terrain/ foudre - impacts/ chocs (engins de chantier, activité humaine à proximité)	-Rupture d'équipements (aériens et enterres) -Fuite	- Rejet et accumulation du produit - incendie
	Défaillance mécanique : - corrosion - fatigue de la canalisation - érosion - défaillances des joints		-Rupture d'équipements -Fuite	- Rejet et accumulation du produit - incendie
	Surpression : - coup de bélier -Montée en pression		-Rupture d'équipements -Fuite	- Rejet et accumulation du produit - incendie
	Erreur humaine : - Opération de maintenance (manœuvre accidentelle de vannes, perte d'information des instruments, mauvaise transmission radiologique)		-Rupture d'équipements -Fuite	- Rejet et accumulation du produit - incendie

III.4. Analyse des risques par la méthode Nœud Papillon :

III.4.1. Identification de l'évènement redouté central (ERC)

Selon le référentiel de la méthode QRA (Guideline for Quantitative Risk Assessment), on note que l'évènement à risque sélectionné est «rupture de canalisation : perte de confinement». L'étape suivante consiste à appliquer la méthode Nœud Papillon sur cet évènement redouté, l'intérêt de cette étape est de permettre la visualisation de tous les chemins possibles, allant des événements basiques aux phénomènes dangereux [11].

III.4.2. Résultats obtenus dans l'unité RTE

Les figures III.6, III.7, III.8 présentent les résultats de l'application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du brut, gaz naturel, condensat de l'unité RTE – Skikda.

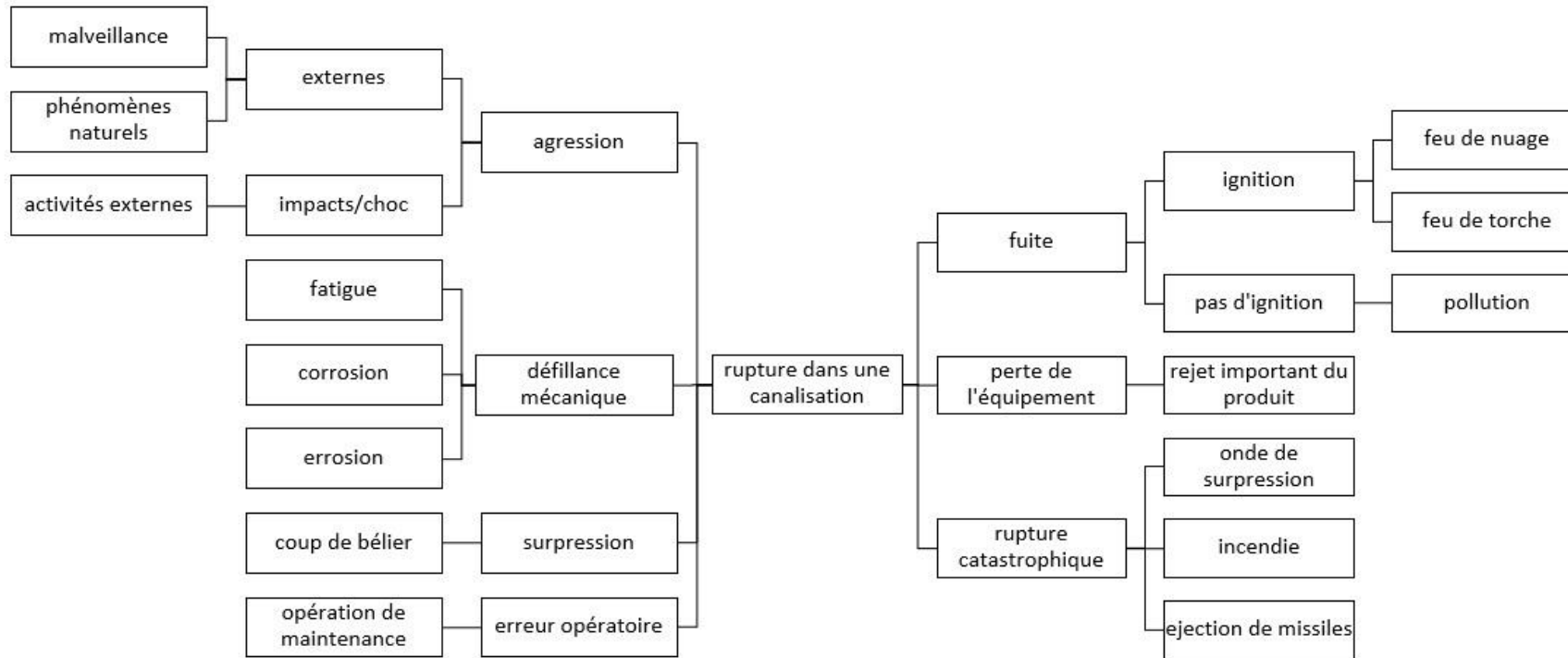


Figure III.6. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Brut

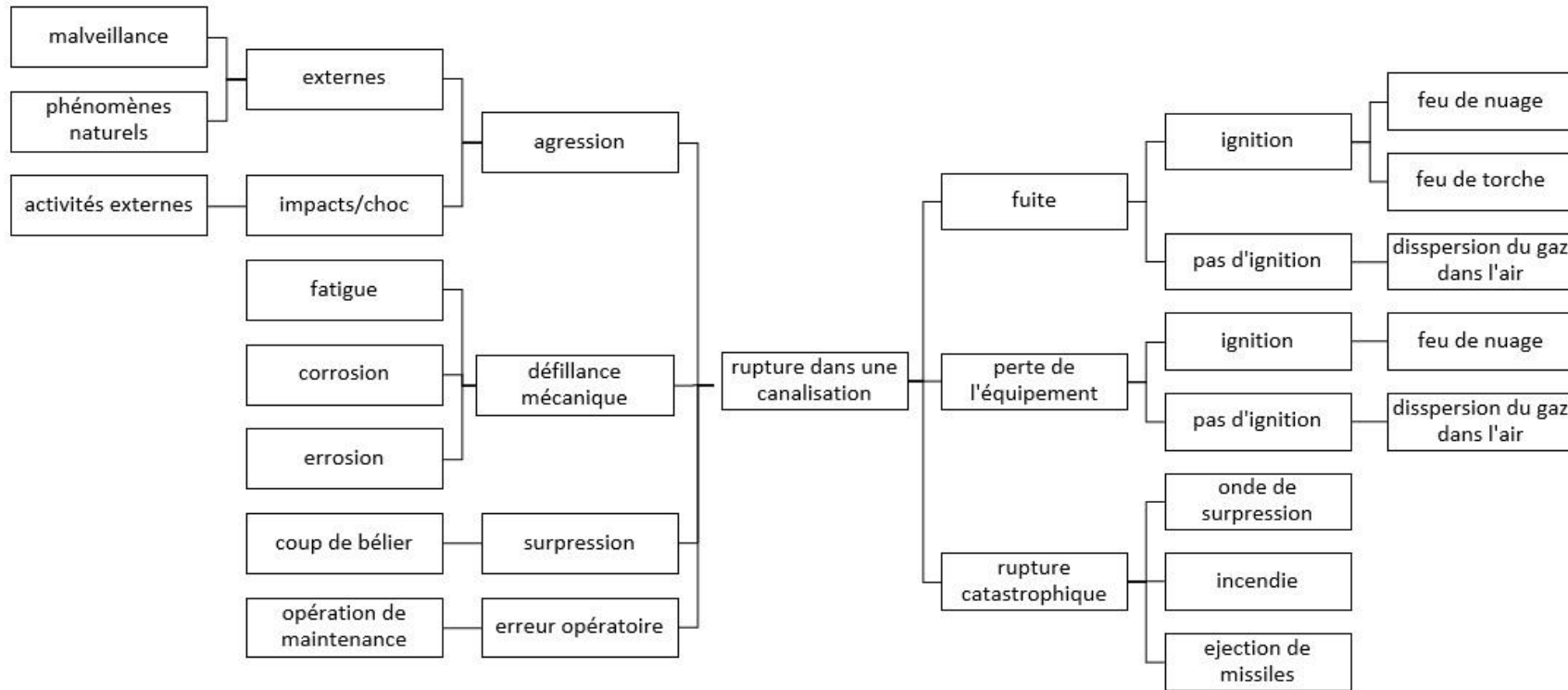


Figure III.7. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Gaz Naturel

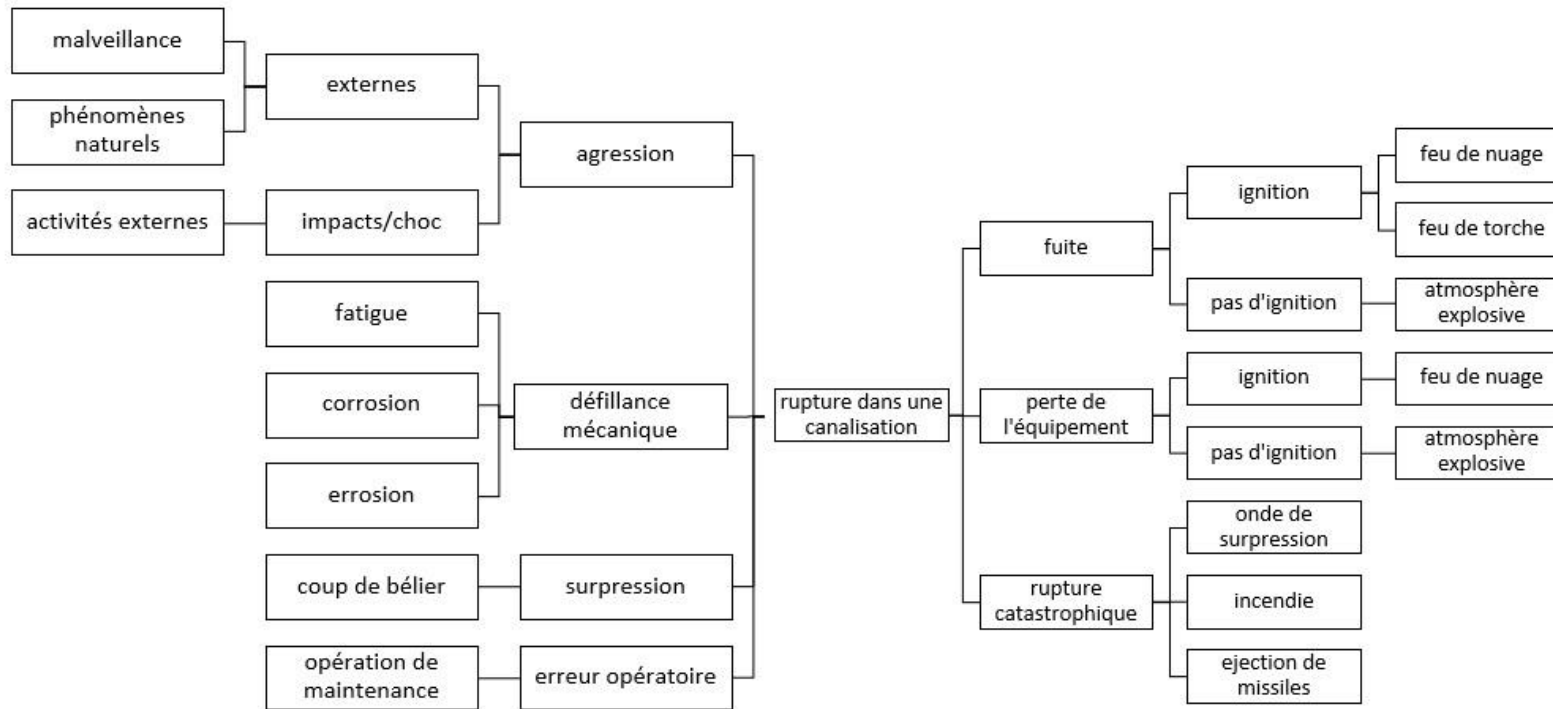


Figure III.8. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Condensat

III.4.3. Résultats obtenus dans l'unité Ra2k

Les figures III.9, III.10, III.11, III.12 présentent les résultats de l'application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du naphtha, kérosène, gasoil (Lourd/léger) et butane depuis l'unité Ra2k vers l'unité Ra1k dans la région de Skikda.

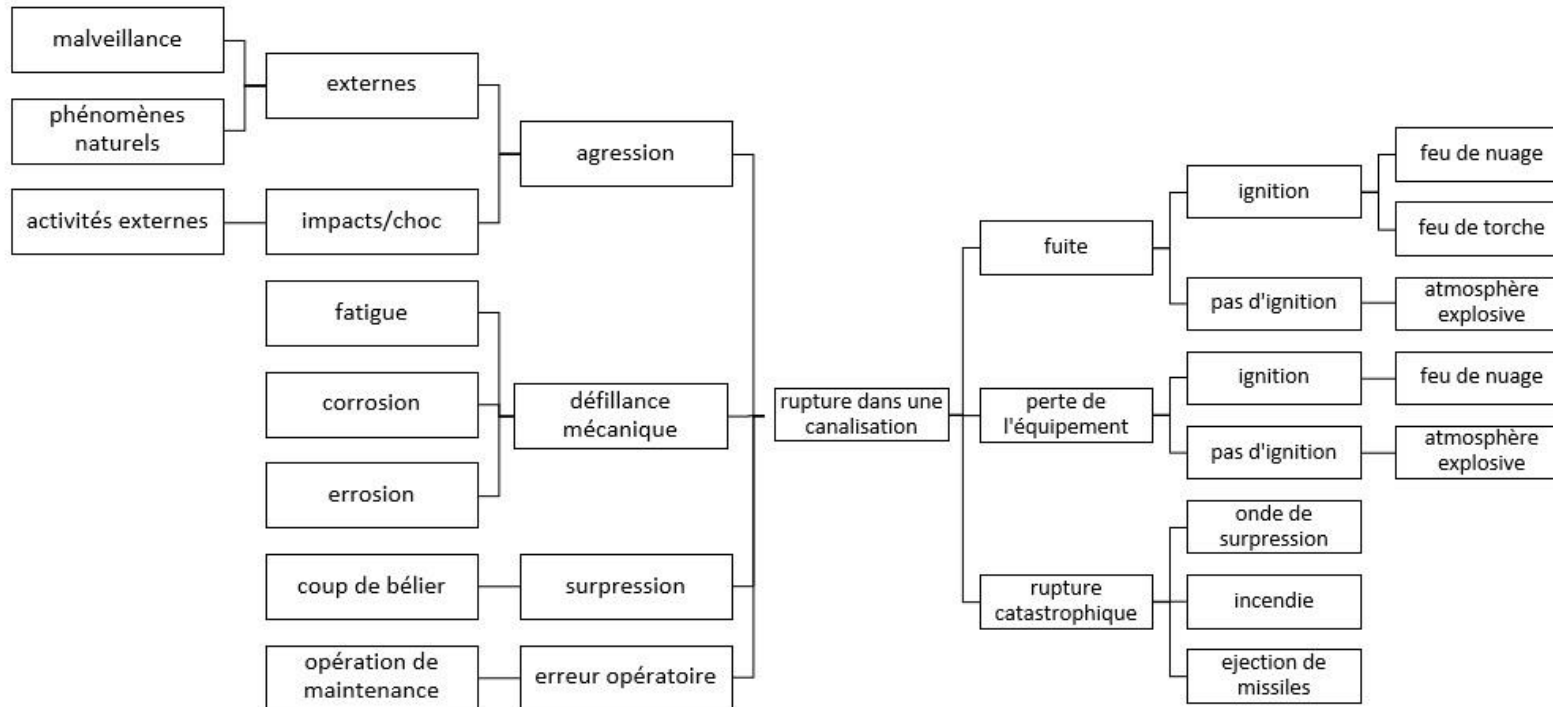


Figure III.9. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Naphta

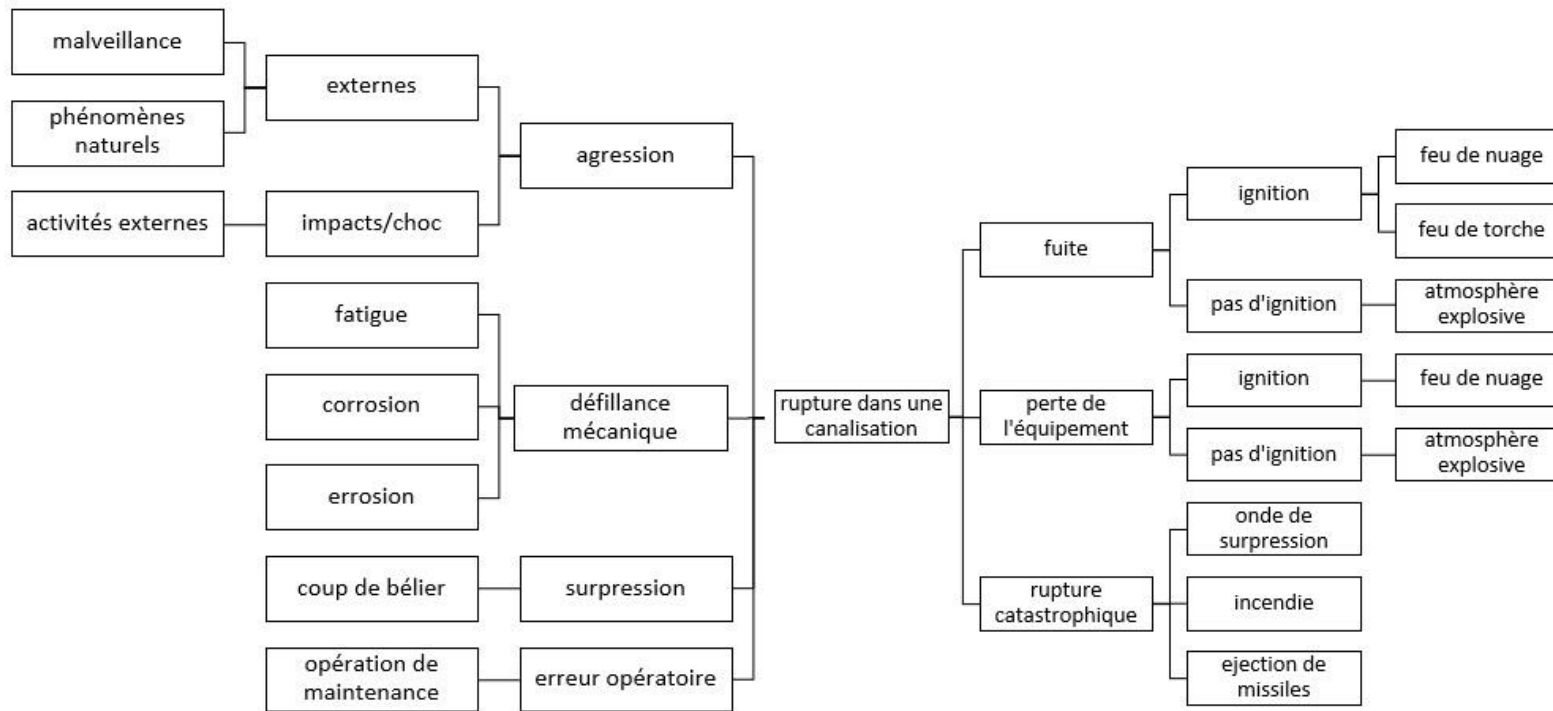


Figure III.10. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Kérosène

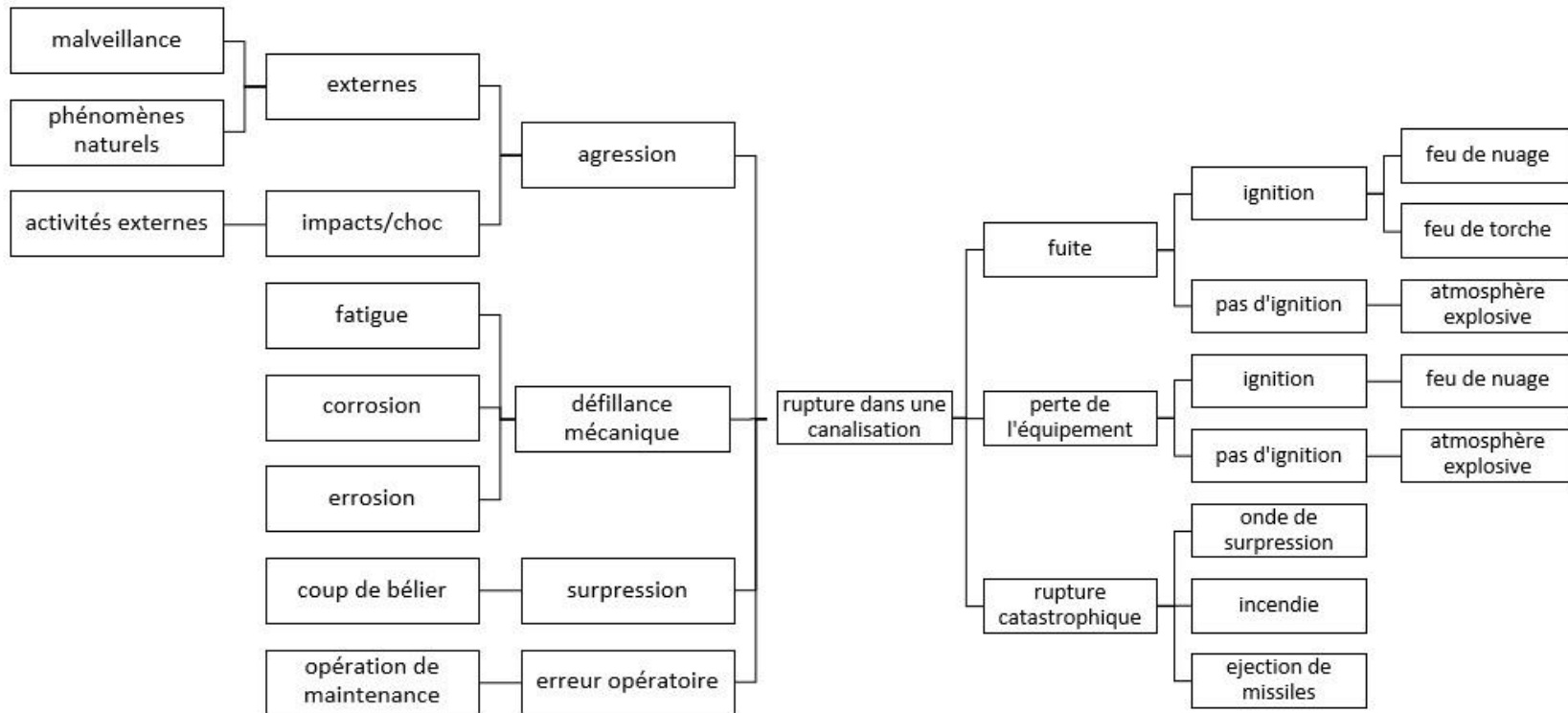


Figure III.11. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Gazoil (lourd/léger)

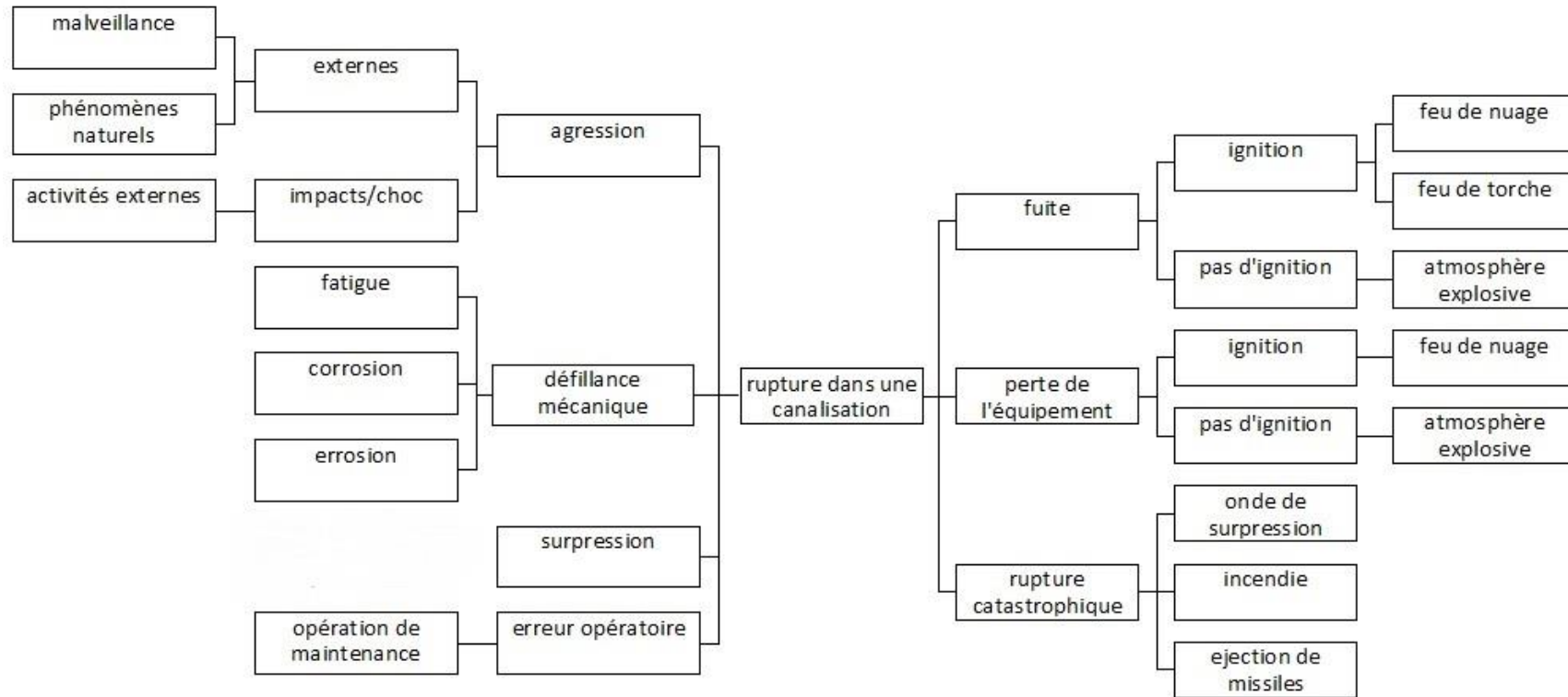


Figure III.12. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Butane

III.4.4. Résultats obtenus dans l'unité NAFTAL

les figures III.13 et III.14 présentent les résultats de l'application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation de l'essence et gasoil depuis l'unité Ra1k vers les centre de dépôts , ce transport est assuré par l'entreprise Naftal * unité canalisation.

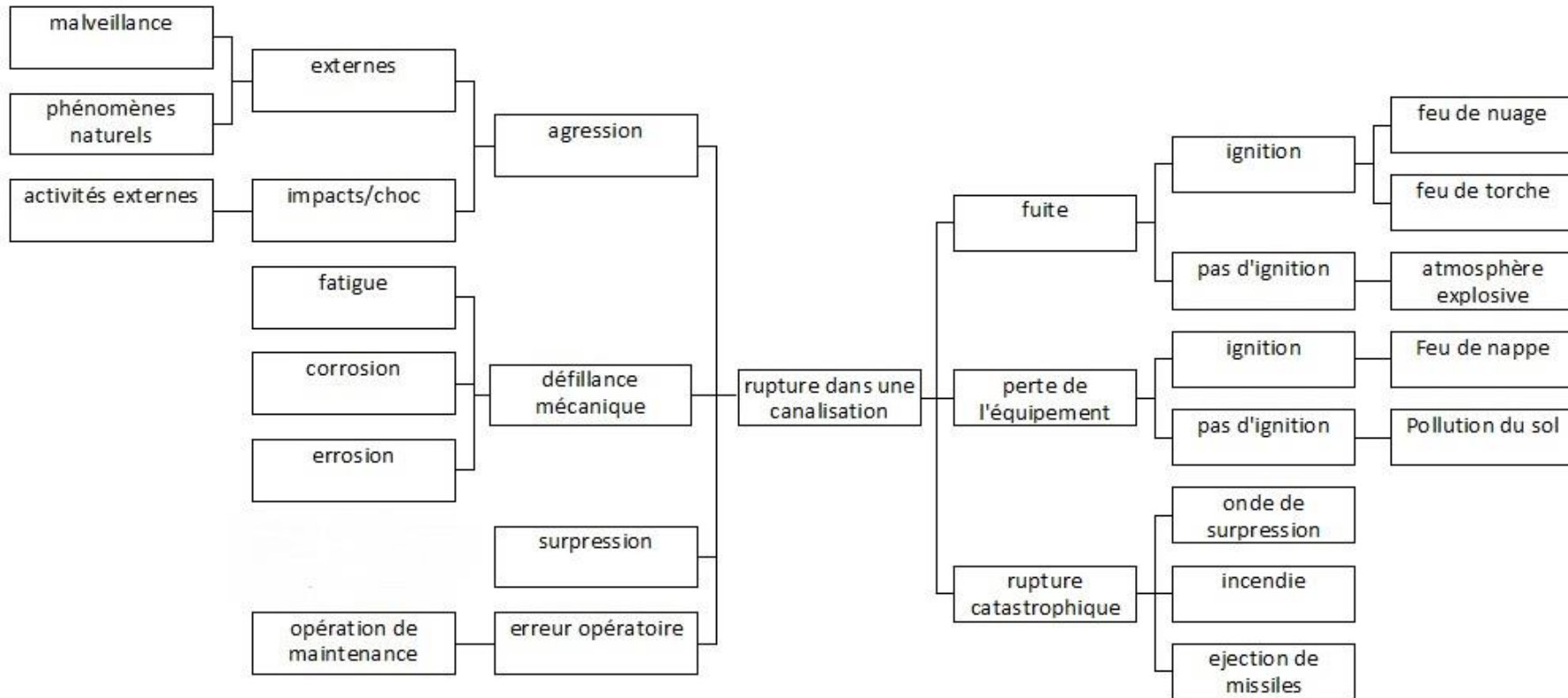


Figure III.13. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation de l'essence

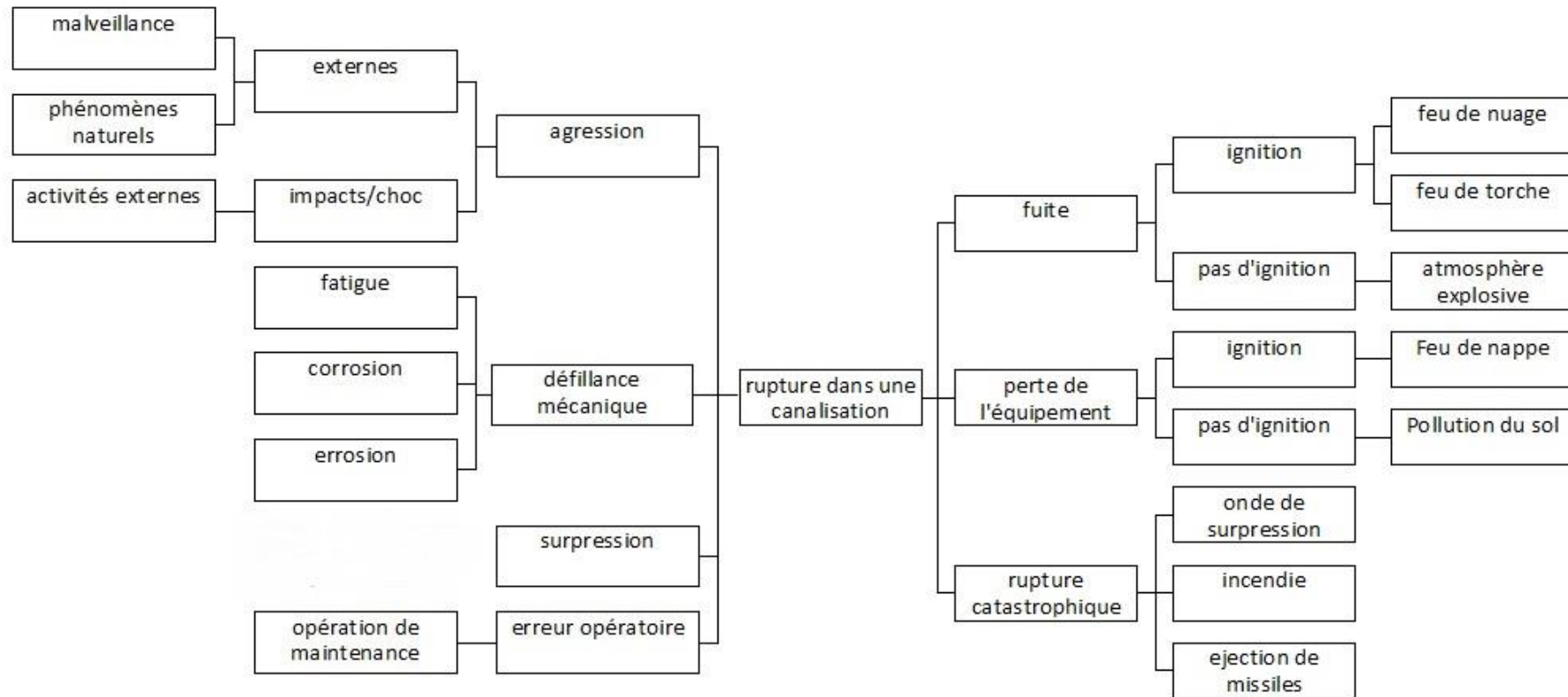


Figure III.14. Application de la méthode Nœud Papillon sur le transport par canalisation du Gasoil

III.4.5. Discussion des résultats obtenus

L'application de la méthode Nœud-Papillon sur le transport par canalisations de différents produits transportés par Terminal RTE-Skikda/ Ra2k/ NAFTAL, nous a permis d'identifier les causes de rupture de la canalisation. Ces causes sont principalement relatives à des agressions externes, des défaillances mécaniques, la surpression et des erreurs opératoires. Par contre les conséquences sont différentes, cette différence est due aux caractéristiques physico-chimiques de chaque produit. Ces conséquences sont caractérisées par des incendies, dispersion atmosphériques et pollution de l'environnement.

III.5. Application de la méthode STPA

L'identification des dangers basée sur la méthode STPA s'est faite en 4 étapes, les résultats sont résumés ci-dessous.

Étape 1: définir le but de l'analyse

Identification des pertes :

- L-1: perte de transport (mission)
- L-2: perte de matériel transporté
- L-3: perte du tuyau
- L-4: perte environnementale
- L-5: perte de vie

Identification des dangers au niveau du système :

- H1: impact / chocs dus aux activités externes à proximité du pipeline [L1 — L5]
- H2: défaillance mécanique de la canalisation L1 / L2 / L3 / L4
- H3: corrosion de la canalisation L1 / L2 / L3 / L4
- H4: surpression dans la canalisation L2 / L3 / L3
- H5: erreurs de fonctionnement: opérations de maintenance L1 --- L5
- H6: panne du système de contrôle dans la salle de contrôle L1 / L2 / L3 / L4
- H7: remplissage excessif du réservoir à la station d'arrivée L2 / L4
- H8: problèmes électriques dans le terminal d'arrivé L2 / L4 / L5
- H9: incendie dans les installations du terminal d'arrivé L4 / L5

Définition des contraintes au niveau du système :

- SC-1: les emplacements du pipeline doivent toujours être marqués H1
- SC-2: une inspection régulière de l'état de la canalisation doit être effectuée H2 / H3
- SC-3: le niveau de corrosion doit être détecté par des contrôles périodiques H3
- SC-4: le niveau de pression constant doit être maintenu H4
- SC-5: suivre les procédures de sécurité lors d'une opération de maintenance H5
- SC-6: avoir un système de redondance en cas de panne du système de contrôle H6
- SC-7: supervision des opérateurs dans la salle de contrôle H7
- SC-8: le détecteur de niveau doit toujours être en bon état de fonctionnement H7
- SC-9: inspection périodique du réseau électrique H8
- SC-10: Les détecteurs d'incendie / gaz doivent toujours être en bon état de fonctionnement H9

Étape 2 : Modélisation de la structure de contrôle

- a1 Informations d'alarme / signaux / états des paramètres physiques*
- a2 commande de sécurité manuelle*
- b1 Protection cathodique du déjeuner*
- b2 Paramètres physiques liés au niveau de corrosion*
- c1 Ouvrir / fermer la soupape de pression*
- c2 Débit / pression débit*
- d1 déclencher le réseau anti-incendies*
- d2 Niveau de l'eau dans le réservoir de stockage d'eau*
- e1 État du niveau de condensat dans le réservoir*
- e2 Démarrez la pompe de vidange*
- f1 Contrôle des différentes actions de sécurité dans toutes les stations (ESD)*
- f2 les données des paramètres physiques / contrôles de sécurité des différentes stations*
- g1 Arrêtez le système en cas d'accident majeur*
- g2 gestion de la sécurité dans le terminal d'arrivée*
- h1 activation des systèmes de sécurité automatiques*
- h2 État du réseau électrique*
- i1 ouverture / fermeture de la vanne d'entrée du terminal d'arrivée (si HL)*
- i2 Niveau du condensat dans le réservoir*

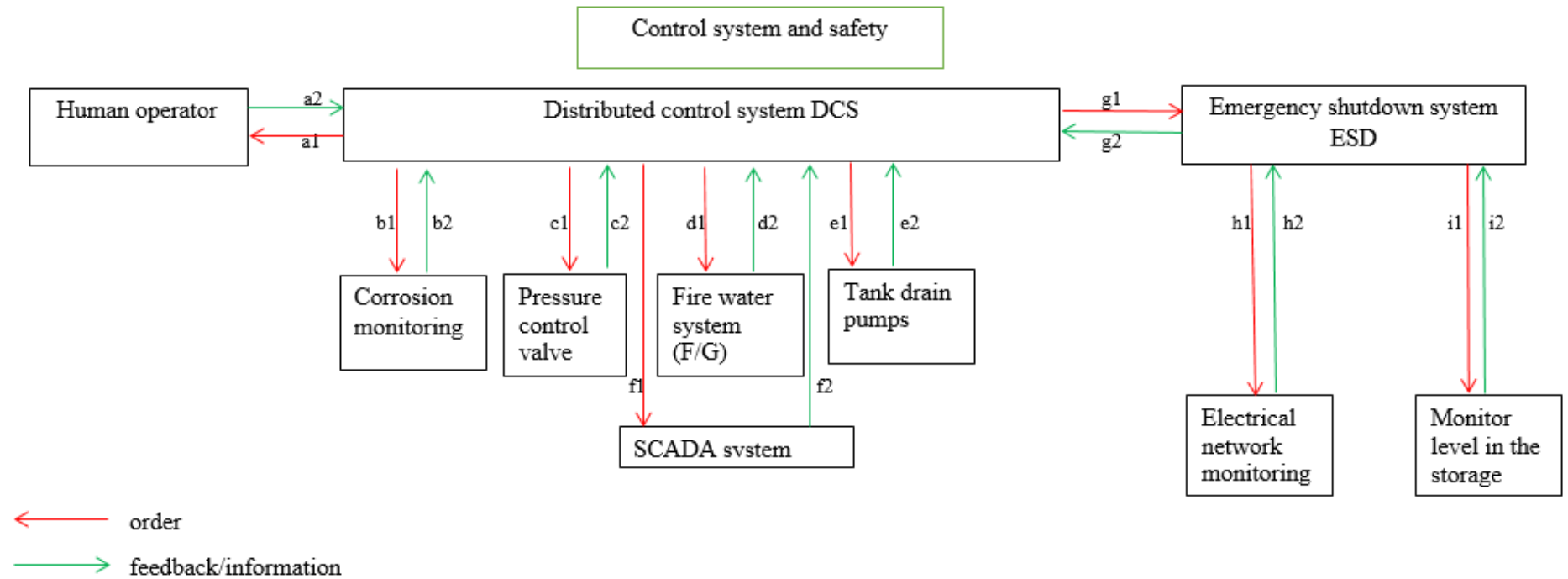


Figure III.15. Structure de contrôle au niveau du terminal d'arrivée

Étape 3: Identifier les actions de contrôle dangereuses

Le tableau III.6 résume les résultats de l'étape 3, toutes les *actions de contrôle dangereuses* identifiées et leurs dangers. Alors que le tableau III.7 concerne les *contraintes du contrôle*, qui sont liées aux actions de contrôle non sécurisées.

Tableau III.6 – Actions de contrôle non sécurisées

Action de contrôle	Ne pas fournir les actions	Fournir les actions	Trop tôt, trop tard, hors services	Arrêté trop tôt, appliqué trop longtemps
Contrôle manuel de sécurité par l'opérateur	UCA1- L'opérateur n'effectue pas les actions correctes pour activer les commandes de sécurité. H4 UCA4- L'opérateur n'active pas toutes les commandes de sécurité H4	l'opérateur fait l'action correcte pour activer les commandes de sécurité	UCA 2 - L'opérateur active les commandes de sécurité trop tard. H4	UCA 3 - L'opérateur arrête les commandes de sécurité trop tôt. H4
Lancement de la protection cathodique	UCA5-DCS ne démarre pas la protection cathodique H2 H3	DCS démarre la protection cathodique	UCA6-Dcs démarre la protection cathodique trop tard H2 H3	UCA7- Dcs démarre la protection cathodique trop tôt H3
Ouvrir / fermer la vanne de régulation de pression	Dcs does not close the pressure valve	UCA8-Dcs orders to close the pressure valve H4	UCA9-Dcs closes the pressure valve too early H4 Dcs closes the pressure valve too late	N/A
	UCA10-Dcs n'ouvre pas la vanne de pression H4	Dcs ordonne d'ouvrir la soupape de pression	Dcs ouvre la soupape de pression trop tôt UCA11-Dcs ouvrir la vanne de pression trop tard H4	N/A
Déclenchez le système anti-incendie	UCA12-Dcs ne déclenche pas le système anti-incendie H9	DCS déclenche le système anti-incendie	Le DCS déclenche le système anti-incendie trop tôt UCA13-Le dcs déclenche le système anti-	UCA14-Le dcs arrête le système anti-incendie trop tôt H9

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

			incendie trop tard H9	
Démarrez les pompes de vidange	UCA15-Dcs n'ordonne pas de démarrer les pompes de vidange H7	Dcs ordonne de démarrer les pompes de vidange	UCA16-Dcs ordonne de démarrer les pompes de vidange trop tard H7	UCA17-Dcs ordonne d'arrêter les pompes de vidange trop tôt H7
Contrôle des actions de sécurité dans les autres stations (système SCADA)	UCA18-Le système SCADA ne contrôle pas les actions de sécurité H3 H4	Le système SCADA contrôle les actions de sécurité	UCA19-Le système SCADA est en panne H3 H4	N/A
Système d'arrêt d'urgence	UCA20- Le système ESD ne déclenche pas H4 H7	Le système ESD démarre	UCA21- Le système ESD déclenche trop tard H4 H7	N/A
Ouvrir / fermer la vanne d'entrée dans le terminal d'arrivée	UCA22-Dcs ne ferme pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée H7	Dcs ordonne de fermer la vanne d'entrée du terminal d'arrivée	UCA23-Dcs ferme la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop tard H7	N/A
	UCA24-Dcs n'ouvre pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée H4	Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée	UCA25-Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop tard H4	UCA26-Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop longtemps H7

Tableau III.7 –Identifications des contraintes du contrôle

actions de contrôle dangereuses	contraintes du contrôle
UCA1- L'opérateur n'effectue pas les actions correctes pour activer les commandes de sécurité. H4	C1- L'opérateur doit effectuer les actions correctes pour activer les commandes de sécurité. UCA1
UCA 2 - L'opérateur active les commandes de sécurité trop tard. H4	C2- l'opérateur ne doit pas activer les commandes de sécurité trop tard UCA2
UCA 3 - L'opérateur arrête les commandes de sécurité trop tôt. H4	C3- L'opérateur ne doit pas arrêter les commandes de sécurité trop tôt.
UCA4 - L'opérateur n'active pas toutes les commandes de sécurité H4	C4- l'opérateur doit activer toutes les commandes de sécurité UCA4
UCA5-Dcs ne démarre pas la protection	C5- Dcs doit démarrer la protection

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

cathodique H2 H3	cathodique UCA5
UCA6-Dcs démarre la protection cathodique trop tard H2 H3	C6- Dcs ne doit pas démarrer la protection cathodique trop tard UCA6
UCA7- Dcs démarre la protection cathodique trop tôt H3	C7- Dcs ne doit pas démarrer la protection cathodique trop tôt UCA7
UCA8-Dcs ordonne de fermer la vanne de pression H4	C8- Dcs ne doit pas ordonner de fermer la vanne de pression UCA8
UCA9-Dcs ferme la soupape de pression trop tôt H4	C9- Dcs ne doit pas fermer la vanne de pression trop tôt UCA9
UCA10-Dcs n'ouvre pas la vanne de pression H4	C10-Dcs doit ouvrir la vanne de pression UCA10
UCA11-Dcs ouvre la soupape de pression trop tard H4	C11- Dcs ne doit pas ouvrir la soupape de pression trop tard UCA11
UCA12-Dcs ne déclenche pas le système anti-incendie H9	C12- Dcs doit déclencher le système d'extinction d'incendie UCA12
UCA13-Le dcs déclenche le système anti-incendie trop tard H9	C13- Dcs ne doit pas déclencher le système d'extinction d'incendie trop tard UCA13
UCA14-Le dcs arrête le système anti-incendie trop tôt H9	C14- le Dcs ne doit pas arrêter le système d'extinction d'incendie trop tôt UCA14
UCA15-Dcs n'ordonne pas de démarrer les pompes de vidange H7	C15- Dcs doit commander pour démarrer les pompes de vidange UCA15
UCA16-Dcs ordonne de démarrer les pompes de vidange trop tard H7	C16- Dcs ne doit pas ordonner de démarrer les pompes de vidange trop tard UCA16
UCA17-Dcs ordonne d'arrêter les pompes de vidange trop tôt H7	C17- Dcs ne doit pas ordonner d'arrêter trop tôt les pompes de vidange H7 UCA17
UCA18-Le système SCADA ne contrôle pas les actions de sécurité H3 H4	C18- Le système SCADA doit contrôler les actions de sécurité UCA18
UCA19-Le système SCADA est en panne H3 H4	C19- Le système SCADA ne doit pas être en panne UCA19
Le système UCA20-ESD ne déclenche pas H4 H7	C20- Le système ESD doit déclencher UCA20
Le système UCA21-ESD déclenche trop tard H4 H7	C21- Le système ESD ne doit pas déclencher trop tard UCA21
UCA22-Dcs ne ferme pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée H7	C22- Dcs doit fermer la vanne d'entrée du terminal d'arrivée UCA22
UCA23-Dcs ferme la vanne d'entrée t du terminal d'arrivée trop tard H7	C23- Dcs ne doit pas fermer la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop tard UCA23
UCA24-Dcs n'ouvre pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée H4	C24- Dcs n'ouvre pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée UCA24
UCA25-Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop tard H4	C25- Dcs ne doit pas ordonner d'ouvrir trop tard la vanne d'entrée du terminal d'arrivée UCA25
UCA26-Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop longtemps H7	C26- Dcs ne doit pas ordonner d'ouvrir la vanne d'entrée de la borne d'arrivée trop longtemps UCA26

Etape 4 : Identifier les scénarios de perte

Le tableau III.8 récapitule tous les scénarios liés aux actions de contrôle dangereuses identifiées précédemment à l'étape 3.

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

Tableau III.8 – Scénarios identifiés

<i>actions de contrôle dangereuses</i>	<i>scénarios</i>	<i>dangers</i>
UCA1- L'opérateur n'effectue pas les actions correctes pour activer les commandes de sécurité. H4	<p>Scénario 1: l'opérateur n'effectue pas les actions manuelles correctes pour activer les commandes de sécurité car il ne reçoit pas les informations en cas de besoin, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p> <p>Scénario 2: l'opérateur n'effectue pas les actions manuelles correctes pour activer les commandes de sécurité car il interprète mal les informations reçus, en raison d'un manque d'expérience, de problèmes personnels</p>	H4
UCA 2 - L'opérateur active les commandes de sécurité trop tard.	<p>Scénario 1: l'opérateur active les commandes de sécurité trop tard, car il ne reçoit pas l'information en cas de besoin, en raison d'un algorithme de commande défectueux</p> <p>Scénario 2: l'opérateur active les commandes de sécurité trop tard, car il a plusieurs tâches à effectuer, en raison de beaucoup de travail à faire et du manque de travailleurs</p> <p>Scénario 3: l'opérateur active les commandes de sécurité trop tard, car il était absent, temps de pause</p>	H4
UCA 3 - L'opérateur arrête les commandes de sécurité trop tôt.	<p>Scénario 1: l'opérateur arrête les commandes de sécurité trop tôt, en raison d'une inadvertance de sa part</p>	H4
UCA4- L'opérateur n'active pas toutes les commandes de sécurité H4	<p>Scénario 1: l'opérateur n'active pas toutes les commandes de sécurité, car il ne reçoit pas toutes les informations en cas de besoin; en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p> <p>Scénario 2: L'opérateur n'active pas toutes les commandes de sécurité, car il interprète mal les informations reçu, faute d'expérience</p>	H4
UCA5-DCS ne démarre pas la protection cathodique H2 H3	<p>Scénario 1: DCS ne démarre pas la protection cathodique, car le contrôleur reçoit information erronée, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p> <p>Scénario 2: DCS ne démarre pas la protection cathodique, en raison d'une valeur erronée envoyée par l'indicateur de corrosion, en raison d'une défaillance de l'indicateur de corrosion</p>	H2 H3
UCA6-Dcs démarre la protection cathodique trop tard H2 H3	<p>Scénario 1: Dcs démarre la protection cathodique trop tard, car les informations ne sont pas reçus en cas de besoin (trop tard), en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p>	H2 H3
UCA7- Dcs démarre la protection cathodique trop tôt H3	<p>Scénario 1: Dcs démarre la protection cathodique trop tôt, car le contrôleur interprète mal les informations reçues, donc il démarre la protection cathodique trop tôt, quand elle n'est pas nécessaire</p>	H3
UCA8-Dcs orders to close the pressure valve H4	<p>Scénario 1: Dcs ordonne de fermer la soupape de pression, car le DC fait une mauvaise</p>	H4

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

	<p>interprétation des informations reçues, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p> <p>Scénario 2: Dcs ordonne de fermer la soupape de pression, car le DC reçoit une mauvaise information (indicateur de pression); donc l'interprétation sera erronée, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p>	
UCA9-Dcs closes the pressure valve too early H4	<p>Scénario 1: Dcs ferme la vanne de pression trop tôt, car le dcs interprète mal les informations reçues, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p> <p>Scénario 2: Dcs ferme la vanne de pression trop tôt, car le dcs reçoit une mauvaise information (indicateur de pression), en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p>	H4
UCA10-Dcs n'ouvre pas la vanne de pression H4	<p>Scénario 1: Dcs n'ouvre pas la vanne de pression, car le dcs interprète mal les informations reçues, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p> <p>Scénario 2: Dcs n'ouvre pas la soupape de pression, car le dcs reçoit une mauvaise information (indicateur de pression), en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p>	H4
UCA11-Dcs ouvrir la vanne de pression trop tard H4	<p>Scénario 1: Dcs ouvre la soupape de pression trop tard, car le DC ne reçoit pas d'informations à temps, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p> <p>Scénario 2: Dcs ouvre la soupape de pression trop tard, car le DC reçoit une mauvaise information (indicateur de pression), en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p>	H4
UCA12-Dcs ne déclenche pas le système anti-incendie H9	<p>Scénario 1: Dcs ne déclenche pas le système de lutte contre les incendies, car le dcs ne reçoit pas d'informations, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p> <p>Scénario 2: Dcs ne déclenche pas le système d'extinction d'incendie, car le dcs interprète mal les informations reçues, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p>	H9
UCA13-Le dcs déclenche le système anti-incendie trop tard H9	<p>Scénario 1: le dcs déclenche le système de lutte contre les incendies trop tard, car le dcs ne reçoit pas d'informations à temps, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p>	H9
UCA14-Le dcs arrête le système anti-incendie trop tôt H9	<p>Scénario 1: le dcs arrête le système de lutte contre les incendies trop tôt, car le dcs interprète mal les informations reçues, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p>	H9
UCA15-Dcs n'ordonne pas de démarrer les pompes de vidange H7	<p>Scénario 1: Dcs n'ordonne pas de démarrer les pompes de vidange, car le dcs interprète mal les informations reçues, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p>	H7
UCA16-Dcs ordonne de démarrer	<p>Scénario 1: Dcs ordonne de démarrer les</p>	H7

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

les pompes de vidange trop tard H7	pompes de vidange trop tard, car le DC ne reçoit pas d'informations à temps, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux	
UCA17-Dcs ordonne d'arrêter les pompes de vidange trop tôt H7	Scénario 1: Dcs ordonne d'arrêter les pompes de vidange trop tôt, car le DC fait une mauvaise interprétation des informations reçues, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux	H7
UCA18-Le système SCADA ne contrôle pas les actions de sécurité H3 H4	Scénario 1: Le système SCADA ne contrôle pas les actions de sécurité, car le système SCADA reçoit une information erroné, en raison d'un modèle de processus inadéquat Scénario 2: Le système SCADA ne contrôle pas les actions de sécurité, car le système SCADA fait une mauvaise interprétation des informations reçus Scénario 3: Le système SCADA ne contrôle pas les actions de sécurité, car le système SCADA ne reçoit pas d' information, en raison d'un algorithme défectueux	H3 H4
UCA19-Le système SCADA est en panne H3 H4	Scénario 1: Le système SCADA est hors service, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux Scénario 2: Le système SCADA est hors service, en raison d'une panne liée aux contrôleurs physiques	H3 H4
UCA20- Le système ESD ne déclenche pas H4 H7	Scénario 1: le système ESD ne se déclenche pas, car le système ESD fait une mauvaise interprétation des informations reçus Scénario 2: le système ESD ne se déclenche pas, car le système ESD reçoit une mauvaise information	H4 H7
UCA21- Le système ESD déclenche trop tard H4 H7	Scénario 1: le système ESD se déclenche trop tard, car le système ESD ne reçoit pas d'information à temps	H4 H7
UCA22-Dcs ne ferme pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée H7	Scénario 1: Dcs ne ferme pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée, car le Dcs reçoit une information erroné, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux Scénario 2: Dcs ne ferme pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée, car les Dcs fait une mauvaise interprétation informations reçues	H7
UCA23-Dcs ferme la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop tard H7	Scénario 1: Dcs ferme la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop tard, car le Dcs ne reçoit pas d'information lorsque cela est nécessaire, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux	H7
UCA24-Dcs n'ouvre pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée H4	Scénario 1: Dcs n'ouvre pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée, car le Dcs reçoit des retours / informations erronés, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux Scénario 2: Dcs n'ouvre pas la vanne d'entrée du terminal d'arrivée, car le dcs fait une mauvaise interprétation de l'information reçue	H4
UCA25-Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop tard H4	Scénario 1: Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop tard, car le DC ne reçoit pas d'information lorsque cela est nécessaire,	H4

**CHAPITRE III - Analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses dans
la région de Skikda**

	en raison d'un algorithme de contrôle défectueux	
UCA26-Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop longtemps H7	<p>Scénario 1: Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop longtemps, car le dcs reçoit une mauvaise information, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux</p> <p>Scénario 2: Dcs ordonne d'ouvrir la vanne d'entrée du terminal d'arrivée trop longtemps, car le dcs interprète mal les informations reçues, en raison d'un algorithme de contrôle défectueux.</p>	H7

III.6. Etude comparative entre l'analyse des risques par la méthode STPA et la méthode Nœud Papillon sur une canalisation

III.6.1. Analyse et comparaison des résultats obtenus

Cette section présente les principaux résultats de comparaison des deux méthodes, STPA et la méthode Nœud-papillon. Le tableau III.9 résume les dangers identifiés par les deux méthodes.

Tableau III.9 – Causes identifiées par les deux méthodes

STPA	Nœud-papillon
impact / chocs dus aux activités externes à proximité du canalisation	Impacts / chocs externes
défaillance mécanique de la canalisation	Corrosion
corrosion de la canalisation	Surpression
surpression dans la canalisation	Érosion
erreurs lors d'une opération : maintenance	erreurs lors d'une opération : maintenance
panne du système de contrôle dans la salle de contrôle	Panne mécanique : fatigue de la canalisation
remplissage excessif du réservoir à la station d'arrivée	Événements naturels
problèmes électriques dans le terminal d'arrivé	Malveillance
incendie dans les installations du terminal d'arrivé	/

À partir du tableau III.9, nous pouvons remarquer que les dangers identifiés par la méthode Nœud-papillon sont les dangers communs identifiés par les deux méthodes.

- Les dangers identifiés par les méthodes Nœud-papillon ne concernent que la canalisation, soit causes internes ou externes.
- Les dangers identifiés par les méthodes STPA sont liés à la canalisation et au système de contrôle de sécurité (salle de contrôle)
- La méthode STPA identifie les dangers tant en amont qu'en aval
- Les dangers qui ne sont pas identifiés par la méthode STPA sont :
 - Événements externes : malveillance, événements naturels, impacts / chocs
 - Événements internes liés à l'état physique de la canalisation
- Les dangers non identifiés par la méthode Nœud-papillon sont principalement liés au :
 - logiciel, pour le contrôle, les systèmes électriques et système feu/gaz dans le terminal d'arrivé

III.6.2. Classification des causes d'accidents identifiés

Le tableau III.10, ci-dessous, montre la classification de tous les dangers identifiés par les deux méthodes, nous pouvons remarquer que le type «Erreurs liées à des composants physiques» a le plus grand nombre de dangers avec les deux méthodes. Nous notons également que la méthode Nœud-papillon n'a identifié aucun danger lié à une erreur système contrairement à la méthode STPA qui en a identifié trois.

Tableau III.10- Classification de causes identifiées

Types	STPA	Nœud-papillon
Erreurs liées à des composants physiques	H2: défaillance mécanique de la canalisation H3: corrosion de la canalisation H4: surpression dans la canalisation H9: incendie dans les installations du terminal d'arrivé	Corrosion Surpression Érosion Panne mécanique : fatigue de la canalisation
Erreur humaine	H5: erreurs de fonctionnement: opérations de maintenance	erreurs lors d'une opération : maintenance
Erreur système	H6: panne du système de contrôle dans la salle de contrôle H7: remplissage excessif du réservoir à la station d'arrivée H8: problèmes électriques dans le terminal d'arrivé	/
Agression externe (événements naturels, activités externes)	H1: impact / chocs dus aux activités externes à proximité du pipeline	Événements naturels Malveillance Impacts / chocs externes

III.6.3. Comparaison des conséquences et scénarios identifiés

Les différentes pertes identifiées par la méthode STPA à sa première étape couvrent plusieurs aspects, comme la fonction principale de notre système qui est le transport du condensat, en plus des dommages environnementaux, la perte du produit transporté et la perte éventuelle de l'être humain, s'il y a sa présence au moment de l'accident.

Alors que la méthode Nœud-papillon identifie plus précisément les pertes sous forme de conséquences directement liées à l'accident : feu de nuage, feu de torche. Le déclenchement de ces incendies est conditionné par la présence d'une source d'ignition, en cas de non-présence de cette dernière on se retrouve avec une atmosphère explosive et perte du produit.

En comparant les conséquences de ces deux méthodes, on constate que la méthode STPA détermine les pertes / conséquences de manière générale, tandis que la méthode Nœud-papillon précise la nature exacte des événements dangereux.

III.6.4. Comparaison des méthodologies

Dans cette partie, nous comparons la méthodologie de chaque méthode utilisée dans cette étude.

Tableau III.11 - Comparaison de la méthodologie de chaque méthode

STPA	Nœud-papillon
/	déterminer l'événement redouté qui est au centre de notre nœud papillon, qui est présélectionné à une étape préliminaire d'analyse des risques qui permet la hiérarchisation des risques
Étapes 1: définir le but de l'analyse, le système, l'environnement du système, les pertes potentielles, les dangers au niveau du système, les contraintes au niveau du système	/
Étape 2: modéliser la structure de contrôle du système étudié, les relations fonctionnelles et les interactions entre les différents composants de l'ensemble du système	constitution de l'arbre de défaillances qui consiste à définir les causes conduisant à l'événement redouté
Étape 3: analyser les actions de contrôle dans la structure de contrôle pour examiner comment elles pourraient conduire à des dangers au niveau du système précédemment identifiés	
Étape 4: identifier les raisons pour lesquelles un contrôle non sécurisé peut se produire, différents scénarios sont créés	/
/	construction de l'arbre des événements pour déterminer la nature des conséquences

Dans le tableau III.11, nous remarquons que toutes les étapes des deux méthodes ne se correspondent pas, à l'exception des étapes 2 et 3 de la méthode STPA qui correspondent à la deuxième étape de la méthode Nœud-papillon, qui est en relation avec la définition des causes et dangers potentiels de l'évènement redouté, et comment ils pourraient nous y conduire. La méthode STPA analyse les dangers principalement liés aux logiciels et aux contrôles du système, tandis que la méthode Nœud-papillon effectue une identification des dangers en relation directe avec la canalisation et ses composants ; cela résume la différence majeure entre eux.

Conclusion

Ce chapitre, nous a permis de lister les différentes entreprises opérantes dans le secteur du transport de matières dangereuses, ainsi une classification des matières dangereuses transportées dans cette région a été faite. Nous avons réalisé une analyse des risques liés aux transports de matières dangereuses par canalisations dans la région de Skikda, en utilisant la méthode Nœud papillon et la méthode STPA. Nous avons également procédé à une étude comparative entre les deux méthodes citées précédemment, qui vise à montrer les différents dangers et scénarios identifiés par chaque méthode. Notre conclusion est que ces deux méthodes se complètent, leur combinaison donnera des résultats plus exhaustifs en ce qui concerne l'identification des dangers.

Références bibliographique

- [1]. Etude de Danger LindeGas Skikda- OPTIME, Documents LindeGas Skikda, 2009
- [2]. RAPPORT D'ÉTUDE DRA-09-90214-00342A : Etude de dangers du terminal brut / condensât de SKIKDA (Algérie), document SONATRACH – RTE, 12/01/2009
- [3]. Manuel d'opération U100, document SONATRACH-RA2K, 28/02//2009
- [4]. Rapport lié aux accidents de transport par voie ferroviaire, Document Direction Générale Protection Civil Skikda, 2018
- [5]. Document présentation de l'unité de canalisation- district carburant de SKIKDA document NAFTAL- CBR, 18/06/2018
- [6]. Etude de Dangers centre Emplisseur 211- District GPL de SKIKDA, document NAFTAL- GPL, 01/2016
- [7]. Fiches techniques ligne 10''-12''SKIKDA/12''KHROUB/12''BERRAHAL, Documents NAFTAL-CBR
- [8]. Fiche technique NK1, SONATRACH – RTE, 2016
- [9]. Manuel d'exploitation Terminal Arrivé – Projet OLEODUC 30''NK1, N°.ABB: 20012-0000-P21-OM-00004, ABB PS&S SpA, document SONATRACH – RTE, 15/07/2008
- [10]. Carte du réseau de transport des hydrocarbures, document SONATRACH TRC, 2013
- [11]. Guideline for quantitative risk assessment 'Purple book', CPR 18E, The Netherlands Organization of applied Scientific Research (2005)

Chapitre IV

*Modélisation des
phénomènes dangereux liés
aux TMD par canalisation
dans la région de Skikda*

Introduction

De nombreuses canalisations traversent la région de Skikda, notamment les canalisations qui assurent l'acheminement des hydrocarbures et leurs dérivés, sur de longues et courtes distances. Ce transport de matières dangereuses par canalisation est assuré par plusieurs entreprises, comme l'unité RTE qui assure le transport de gaz naturel, brut et condensat depuis le sud Algérien. L'unité Ra2k qui fait le raffinage du condensat et transfère les produits obtenus vers la raffinerie Ra1k.

Ce mode de transport n'est pas à l'abri des accidents qui peuvent se produire à tout moment, d'où l'intérêt de la modélisation des phénomènes dangereux liés aux matières transportées par canalisation, afin de déterminer les effets probables sur les installations et les travailleurs, ainsi que leurs intensités.

IV.1. Modélisation mathématique des phénomènes dangereux

Différents phénomènes dangereux peuvent avoir lieu pendant les phases de transport de matières dangereuses par canalisation, qui sont principalement des phénomènes de dispersion atmosphérique, d'incendie (feu de nuage, feu torche, et feu de nappe) et d'explosion (explosion de nuage de vapeur dans l'air libre VCE).

IV.1.1. Dispersion atmosphérique

La dispersion atmosphérique est engendrée par la mise à l'atmosphère sous la forme d'un jet de produit initialement sous pression, c'est un phénomène qui a fait et qui continue de faire l'objet de nombreuses investigations (études théoriques et études expérimentales). La maîtrise de la géométrie du nuage et de sa dérive dans le temps, est nécessaire pour déterminer les distances de dispersion, par rapport au point de rejet du produit [1]

Trois principales familles d'outils de calcul existent. Elles sont citées ci-dessous :

- les modèles de type gaussien, qui permettent d'estimer la dispersion des gaz neutres ou passifs de masse volumique très proche de celle de l'air ;
- les modèles de type intégral, à utiliser dès que le rejet perturbe l'écoulement atmosphérique de l'air.
- les modèles tridimensionnels, parfois appelés outils 3D, qui permettent de résoudre les équations de la mécanique des fluides.

IV.1.1.1. Modèles gaussiens

Un modèle gaussien permet de modéliser la dispersion d'un gaz du fait de la seule action du fluide porteur, l'air. Le transport et la diffusion du gaz vont alors dépendre du vent et de la turbulence atmosphérique d'origine mécanique ou thermique.

Le modèle gaussien s'applique aux rejets de gaz neutres ou passifs. Le produit rejeté doit donc avoir : une densité à peu près égale à celle de l'air (ou bien il est très dilué) ; une température identique à celle de l'air et une vitesse initiale relative nulle.

Il faut rappeler que les modèles gaussiens s'attachent à modéliser la dispersion à partir d'équations paramétrées et simplifiées [2]. De fait, la qualité de ce type de modèle est conditionnée par les éléments suivants :

- La direction et la vitesse du vent doit être constante,
- Pas de présence de reliefs, d'obstacles (murs, bâtiments...),
- Le nuage ne doit pas être trop éloigné du sol,
- Distances en général supérieures à 100 m et inférieures à 10 km.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \alpha \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (\text{Équation IV.1})$$

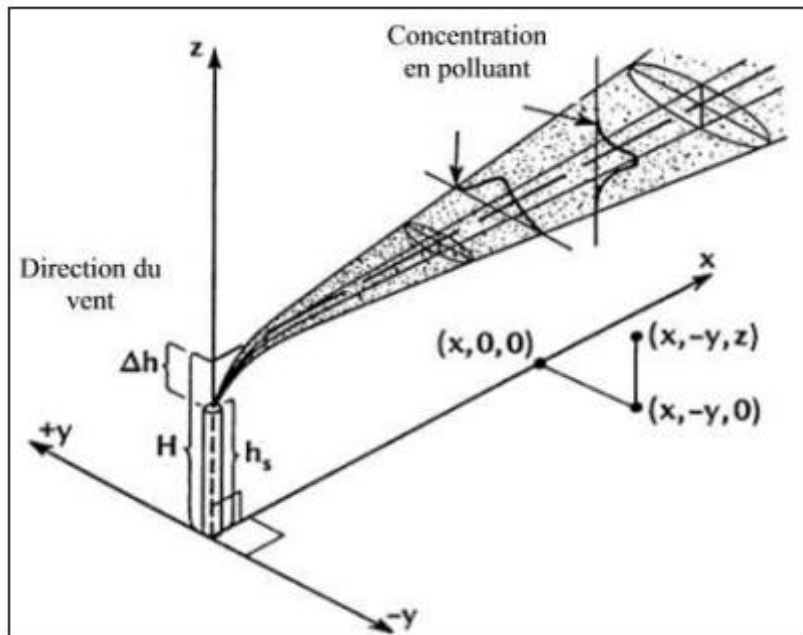


Figure IV.1. Schéma de la dispersion gaussienne [1]

IV.1.1.2. Modèles intégraux

Les modèles intégraux sont basés sur des équations de la mécanique des fluides simplifiées pour permettre une résolution rapide. L'emploi d'un modèle intégral permet de modéliser les mécanismes physiques suivants [1], qui ne peuvent être considérés avec un modèle gaussien :

- les effets de la dynamique des rejets à même d'engendrer une turbulence spécifique, pour les rejets sous forme de jet à grande vitesse d'émission ;
- les effets de gravité, pour les rejets de gaz lourds ;
- les effets de flottabilité pour les rejets de gaz légers.

Ce type de modèle s'applique aux gaz neutres, aux gaz denses et parfois aux gaz légers (pour les versions les plus récentes des logiciels) [3], et comprend :

- dans la plupart des cas, un module de calcul permettant de déterminer de façon plus ou moins forfaitaire le terme source de rejet en fonction des conditions de stockage du produit et du type de rejet (rupture guillotine, ruine du réservoir, évaporation de flaque...).
- la prise en compte de la turbulence atmosphérique par l'intermédiaire de classes de stabilité atmosphérique
- Le terrain est supposé être homogène et idéalement plat afin de ne pas introduire des perturbations complexes de l'écoulement de l'air. Les caractéristiques du terrain sont définies sous la forme d'une seule hauteur de rugosité pour toute la région du rejet.
- Le champ de vent est uniforme. Dans la plupart des cas, le profil vertical du vent est retenu comme constant.

Il existe plusieurs logiciels de type intégral tels que Phast (DNV Software), EFFECTS (TNO), Sevex (Atm-Pro/Faculté Polytechnique de Mons) et Aloha (US EPA).

IV.1.1.3. Modèles tridimensionnels CFD

Les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics), parfois appelés outils 3D, qui permettent de prendre en compte la complexité de l'environnement (obstacles, relief, ...) en s'appuyant sur la résolution des équations de la mécanique des fluides, avec un champ d'application étendu et prennent en compte les débits variables et sources multiples. Ce type de modélisation tridimensionnelle apporte des informations qualitatives en plus des résultats quantitatifs.

Les simplifications des équations de la mécanique des fluides sont beaucoup moins poussées que celles effectuées dans les modèles intégraux. La validation de certains outils CFD peut nécessiter un calage empirique de quelques paramètres.

En pratique, les outils de calcul CFD tridimensionnels ne permettent pas toujours de calculer le terme source. Par ailleurs, la plupart des outils CFD tridimensionnels ne peuvent traiter directement les mécanismes liés à des rejets diphasiques. [1]

L'utilisation de ce type d'outil nécessite du personnel « spécialisé », du matériel de calcul performant et surtout des données complètes et précises dont l'acquisition est indispensable pour la modélisation.

Les logiciels Fluidyn Panair, FLACS, Fluent, Aria risk sont des modèles de type CFD/3D (Ce type d'outil est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes) [2].

IV.1.1.4. Modèle UDM de dispersion du logiciel PHAST

L'U.D.M. ou "Unified Dispersion Model" concerne la dispersion de jets, de gaz denses, légers ou passifs incluant les phases de formation de flaque et de ré-évaporation. La version originale de l'UDM a été développée par Cook et Woodward au début des années 1990. Dans cette version, les différentes phases de dispersion sont simulées avec des sous-modèles qu'il faut assembler de façon astucieuse pour modéliser un scénario donné.

Pour éliminer les discontinuités entre les résultats des sous-modèles, une nouvelle version d'UDM a été mise au point dans laquelle il est possible de calculer un profil uniforme de concentration intégrant les différentes phases de la dispersion. D'autre part, ce nouveau modèle prend en compte les phénomènes d'évaporation, de formation de flaque, d'élévation du nuage et de dispersion variable au cours du temps. UDM est capable de traiter un grand nombre de produits, qu'ils soient toxiques et/ou inflammables, légers, lourds ou neutres. Il traite les rejets liquides, gazeux ou diphasiques. Pour les rejets diphasiques, il modélise la formation et l'évaporation de flaque.[3]

La description détaillée du modèle UDM est contenue dans le « UDM Theory Document » [4] et « UDM Theory-validation Document » [5]. Ce modèle est capable de traiter un grand nombre de produits, qu'ils soient toxiques et/ou inflammables, légers, lourds ou neutres. Il traite les rejets liquides, gazeux ou diphasiques. Pour les rejets diphasiques, il modélise la formation et l'évaporation de flaque. Il est aussi capable de traiter les rejets instantanés, continus et de durée finie. De plus, il permet de modéliser les rejets variables dans le temps.

IV.1.2. Incendie

IV.1.2.1. Feu de nuage

Le phénomène de « feu de nuage / flash fire » correspond à la combustion en champ libre d'un nuage inflammable allumé par une source de faible énergie. Une source de faible énergie peut être assimilée à une étincelle électrique, mécanique ou électrostatique, ou à un point chaud de température supérieure à la température d'auto inflammation du mélange gazeux. Ce phénomène est difficile à modéliser en l'état actuel des connaissances. Néanmoins, une

bonne approximation de ces plus grandes distances déterminant des effets thermiques sur l'homme serait obtenue en retenant une distance de l'ordre de la LIE. [6]

- Les seuils des effets irréversibles correspondent aux distances égales à 110% de la distance à la LIE.

- Les seuils des premiers effets létaux (SEL) ainsi que les effets létaux significatifs (SELS) correspondent aux distances égales 100% de la distance à la LIE.

La distance à la LIE est obtenue avec le logiciel PHAST lors de la modélisation de la dispersion atmosphérique.

Parmi les modèles mathématiques utilisés pour modéliser ce phénomène, on peut citer le modèle basé sur les travaux de Raj et al [7], qui correspond à des observations expérimentales, effectuées suite à l'inflammation de nuages explosibles air - hydrocarbures en champ libre et quasiment au repos, et sont à la base de ce modèle ; les observations suivantes :

- le nuage est consommé par un front de flamme qui se propage avec une vitesse V_f pratiquement proportionnelle à la vitesse du vent ;
- Cette vitesse du front de flamme peut être considérée constante ;
- la hauteur de flamme H_f varie comme une fonction croissante avec la concentration en gaz combustible si celle-ci est supérieure à la stœchiométrie. Pour des mélanges avec une concentration en combustible égale ou inférieure à la stœchiométrie, la hauteur de la flamme est égale à celle du nuage explosible ;
- Il existe une relation presque proportionnelle entre la hauteur visible de la flamme H_f et sa largeur W ,
- enfin, les caractéristiques du nuage peuvent être admises constantes durant la propagation des flammes.

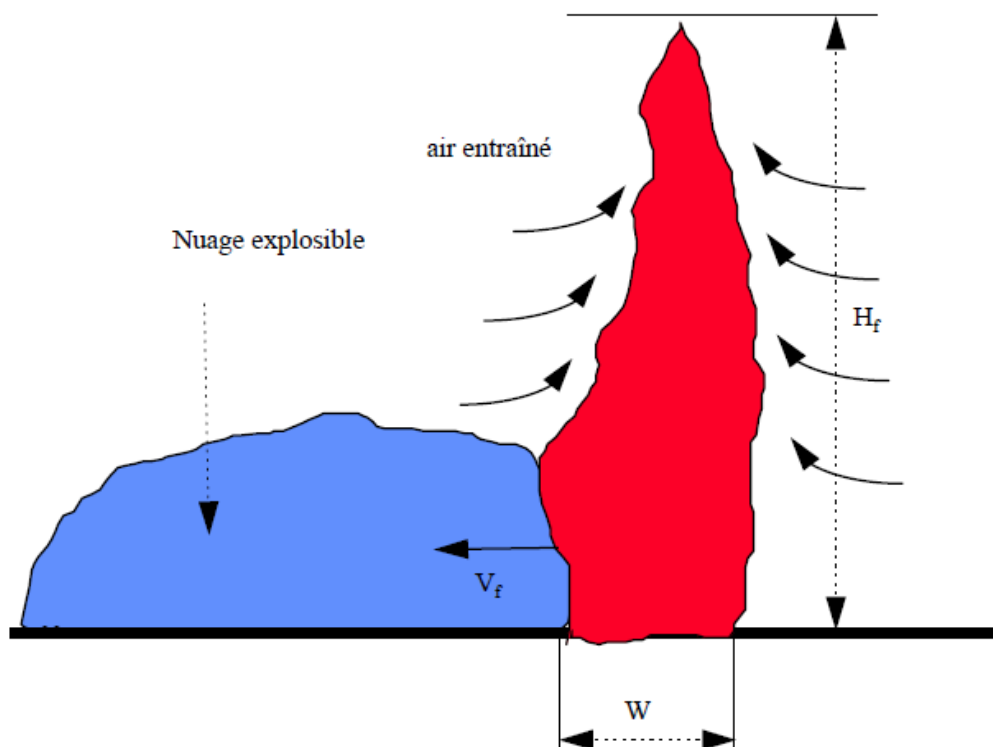


Figure IV.2. Représentation schématique de la propagation des flammes dans un nuage explosible formé en champ libre et initialement quasi au repos [7]

IV.1.2.2. Feu torche

Lorsqu'un jet liquide ou gazeux issu d'une fuite accidentelle s'enflamme par l'intermédiaire d'une source d'inflammation quelconque (par exemple, une surface chaude), le feu torche prend naissance sous forme d'une flamme de diffusion. Le jet combustible émerge d'une canalisation ou d'un orifice et entre dans l'air ambiant qui est en général au repos. La principale caractéristique de la flamme de diffusion est que le combustible et l'air sont initialement séparés et que la combustion se produit dans la zone où le mélange comburant-combustible se fait. Le jet combustible se mélange ainsi à l'air par entraînement et diffusion et avec l'aide d'une source d'inflammation, se met à brûler seulement lorsque les concentrations de combustible et d'air sont comprises dans une plage définie entre les limites d'inflammabilité (LII/LIE et LSI/LES). Chaque produit possède ainsi un domaine d'inflammabilité spécifique. [8]

Plusieurs chercheurs ont développé des modèles mathématiques de modélisation du phénomène, qui se base sur le type de diffusion de la flamme, ainsi que l'effet du vent sur cette dernière. Il y a :

Modèle de flamme de diffusion laminaire

Hottel & Hawthorne [9] et Hawthorne & al. [10] ont réalisé respectivement des études sur les jets enflammés laminaires et turbulents.

Pour une flamme de type « laminaire », la hauteur de flamme augmente avec la vitesse de sortie de jet. Dans ce régime d'écoulement et pour les hydrocarbures, elle est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{L}{d_j} = \frac{Q_j C_0}{4\pi D_v d_j C_T} \quad \text{(Équation IV.2)}$$

où : Q_j : débit volumétrique (m³/s),

C_0 : fraction molaire de combustible dans le jet,

C_T : fraction molaire pour une combustion stœchiométrique,

d_j : diamètre de jet (m),

L : longueur de flamme (m),

D_v : diffusivité thermique (m²/s).

Modèles de flamme de diffusion turbulente

a- Modèle de Hawthorne

Le régime de la flamme de diffusion du feu de torche est généralement « pleinement turbulent ». Concernant ce type de flamme, les premières expériences et modèles théoriques sur les hauteurs de flamme ont été développés par Hawthorne & al. [10]. Ces essais ont conduit à une expression de la longueur de flamme pour les jets gazeux turbulents brûlant dans un air initialement au repos :

$$\frac{L_T}{d_j} = \frac{5,3}{C_T} \left[\frac{T_F}{a_T T_j} \left(C_T + (1 - C_T) \frac{M_a}{M_f} \right) \right]^{1/2} \quad \text{(Équation IV.3)}$$

où L_T : longueur visible de la partie turbulente de la flamme mesurée à partir de la transition entre partie laminaire et turbulente (m),

d_j : Diamètre du jet (m),

T_F, T_j : Température adiabatique de flamme et température initiale du jet (K),

M_a, M_f : masse molaire de l'air et du combustible (kg/mol),

α_T : Rapport molaire des réactifs sur les produits de combustion pour un mélange stœchiométrique,

C_T : concentration de combustible dans le mélange stœchiométrique air/combustible.

b- Modèle de Brzustowski

Brzustowski [11]-[12] propose un critère sur la concentration en combustible qui doit être égale à la limite inférieure d'inflammabilité au sommet des flammes de diffusion fortement turbulentes (valables pour les très hauts nombres de Reynolds). De par ce critère, la longueur de flamme L_f pour des jets dominés par la convection forcée est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{L_f}{d_j} = \frac{Y_{fj}}{0,32} \left(\frac{\rho_j}{\rho_a} \right)^{1/2} \left[1 + \frac{M_a}{M_f} \left(\frac{1}{0,297 C_L} - 1 \right) \right] \quad \text{(Équation IV.4)}$$

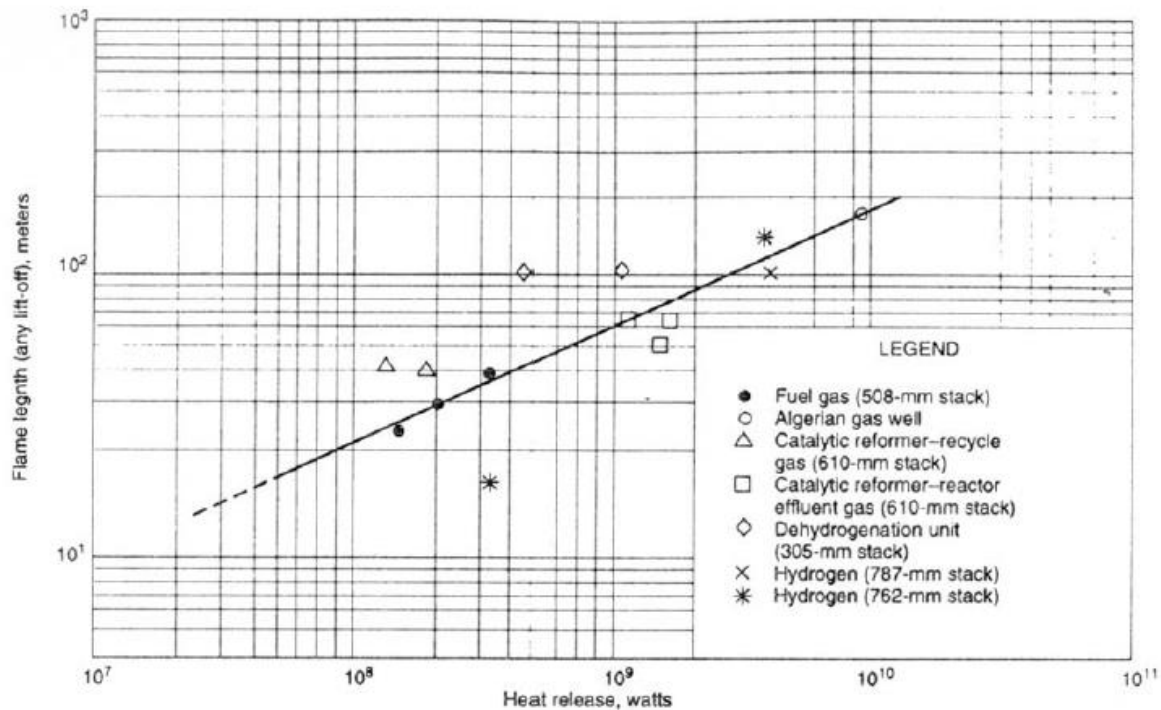
où : Y_{fj} : fraction massique du combustible dans le jet,

ρ_j, ρ_a : masse volumique du jet et de l'air (kg/m³),

C_L : concentration de combustible à la LIE en termes de volume.

c- Modèle de l'API RP 521

Les modèles susmentionnés présentent des approches physiques voire semi-empiriques pour déterminer la longueur de flamme. A l'aide de différents résultats d'expériences donnant la longueur de flamme en fonction de la puissance calorifique liée au débit à l'orifice, le modèle suivant propose de définir la longueur de flamme plus simplement par une corrélation empirique. C'est ainsi qu'à partir du modèle de API RP 521 (American Petroleum Institute Guide For Pressure Relieving An Depressing Systems, Api Recommended Practice 521), que l'UFIP (Union Française des Industries Pétrolières) a proposé une formule empirique de la longueur de flamme.



$$L_f = 2,24 \cdot 10^{-3} (\dot{Q})^{1/2} \text{ avec : } 30 \text{ MW} \leq \dot{Q} \leq 10^4 \text{ MW} \quad (\text{Équation IV.5})$$

Où $\dot{Q} = m \Delta H_c$ puissance dégagée par la combustion

m : débit massique de jet (kg/s)

ΔH_c : chaleur de combustion (J/kg)

d- Model de SHELL

Un feu alimenté gazeux correspond à l'inflammation d'un jet alimenté en gaz suite à une rupture de ligne (de gaz, diphasique ou liquide qui flashe à la brèche). La modélisation du feu alimenté gazeux généré par un feu de gaz alimenté est fondée sur le modèle tronconique mono source (ou modèle Shell). Ce scénario est quantifié avec l'aide du logiciel PHAST. Le jet de flammes est modélisé par un tronc de cône avec une source ponctuelle localisée au barycentre du tronc de cône. Cette modélisation permet la prise en compte [14]:

- de l'angle formé à la brèche entre le jet et l'horizontale,
- de la vitesse du vent qui entraîne une variation angulaire de l'axe de la flamme,
- de la masse molaire du gaz combustible,
- du nombre de Richardson de l'écoulement.

Le modèle calcule successivement :

- la vitesse du jet au travers de la brèche,
- le diamètre fictif de l'orifice du jet,
- les dimensions du tronc de cône,
- la position du barycentre du tronc de cône (source ponctuelle du rayonnement thermique),
- la longueur de flamme,
- la surface rayonnante du jet de flamme.

Ce modèle est inclus dans le module "Jet Fire" du logiciel PHAST qui permet ainsi de quantifier les distances correspondantes aux seuils d'effets retenus.

IV.1.2.3. Les feux de nappe

Il s'agit de nappes de produits inflammables alimentées par une rupture de canalisation en unités notamment, avec extension non limitée sur le sol. La combustion des produits liquides (par ex. les hydrocarbures) intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé et non le liquide lui-même. De manière schématique, le combustible émet une certaine quantité de vapeurs à une température donnée. Cette émission de vapeurs conduit à la formation d'une zone riche en combustible au-dessus de la nappe. Au fur et à mesure de son élévation, le combustible entraîne de l'air froid extérieur.

Lorsque le mélange air-combustible se trouve dans le domaine d'inflammabilité et en présence d'une source d'inflammation, il s'enflamme.

La surface en feu retenue correspond à la surface cylindrique recouverte par le produit inflammable après relâchement du contenu du système rompu [15].

Les sources d'inflammation du combustible peuvent être de natures diverses :

- moteur électrique,
- travaux de soudage,
- étincelle (d'origine électrique, mécanique ou électrostatique),
- foudre,

Modélisation du phénomène

La modélisation du phénomène permet de calculer les distances de danger associées aux différents seuils d'effets thermiques. La modélisation du feu de nappe liquide utilise le modèle de la flamme solide dans lequel la flamme est assimilée à un volume opaque de géométrie simple (cylindre, parallélépipède rectangle selon la forme de la surface liquide) dont les surfaces rayonnent uniformément. Cette modélisation permet de prendre en compte [15] :

- La vitesse du vent,
- L'angle d'inclinaison de la flamme,
- L'atténuation de l'air,

Le modèle calcule successivement :

- Le débit massique de combustion,
- L'angle d'inclinaison de la flamme,
- Le diamètre équivalent de la flamme,
- La radiance du feu,
- La hauteur de la flamme,
- L'atténuation de l'air.

Le modèle original de feu de nappe mis en œuvre dans le logiciel PHAST a été développé par Cook et al.[16] pour les feux de nappe d'hydrocarbures pour prédire le taux de combustion, la géométrie du feu et le pouvoir émissif de surface de la flamme et décrit le calcul des niveaux de rayonnement d'une flamme de jet, d'un feu de nappe ou BLEVE. L'aperçu de Mudan [17] comprend l'essentiel de la théorie adoptée dans ce modèle.

a) Vaporisation

$$\Delta H_v^* = \Delta H_v + C_{pL}(T_b)max\{0, T_b - T_a\} \tag{Équation IV.6}$$

b) Taux de combustion m_{max}

Si le taux de combustion M_{max} est définie dans la base donnée du logiciel ($M_{max} > 0.001$), alors le taux maximum est défini comme : $m_{max} = M_{max}$, sinon il est déterminé en multipliant la vitesse de combustion (m/s) par la densité du carburant liquide ρ_L (kg/m^3)

$$m_{max} = 1.27 * 10^{-6} \rho_L \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v^*}, \text{ generale fire FLMTYP} = 2 \tag{Équation IV.7}$$

$$m_{max} = 10^{-3} \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v^*}, \text{ hydrocarbure FLMTYP} = 0,1 \tag{Équation IV.8}$$

c) Le diamètre équivalent de la flamme

Dans le cas d'un " feu de nappe précoce ", un allumage immédiat est supposé et le diamètre de feu en régime permanent D est calculé en supposant que le taux de combustion total $[\pi D^2 / 4] m_{max}$ est égal au taux de déversement Bobine (kg / s), avec la limite supérieure du diamètre (D_{Limit}) étant le diamètre du bassin lui-même

s'il est défini ou le diamètre de la digue. Ces limites sont appliquées pour éviter des diamètres trop grands pour les rejets de courte durée.

$$D = \min \left[D_{Limit}, 2 \sqrt{\frac{S_{pool}}{\pi m_{max}}} \right] \quad \text{(Équation IV.9)}$$

En cas de «feu de nappe tardif», la propagation du pool fire est supposée avoir lieu avant l'allumage. Dans ce cas, le diamètre du feu est directement entré dans le modèle. Le diamètre du feu doit également être entré dans le cas d'un taux de combustion spécifié par l'utilisateur.

- d) Définir le taux de combustion m (kg/m²/s)
- Le taux de combustion m est asymptotique à sa valeur maximale m_{max} pour les grands diamètres

$$m = m_{max} \left[1 - e^{-D/L_b} \right] \quad \text{(Équation IV.10)}$$

- e) Hauteur de la flamme H

La corrélation Thomas [18] est largement adoptée pour définir la hauteur de la flamme en termes de diamètre de flamme, de vitesse de combustion et de densité ambiante.

$$H = 42 D \left[\frac{m}{\rho_a \sqrt{g D}} \right]^{0,61} \quad \text{(Équation IV.11)}$$

On retrouve aussi, la formule de Thomas [18] qui inclut les effets de la vitesse du vent

$$H = 55 D \left[\frac{m}{\rho_a \sqrt{g D}} \right]^{0,67} (u_*)^{-0,21} \quad \text{(Équation IV.12)}$$

$$\text{Avec } u_* = u_a \left[\frac{g m D}{\rho_v} \right]^{-1/3} \quad \text{(Équation IV.13)}$$

où u_a : Vitesse du vent m/s
 g : Accélération gravitationnelle m/s²
 ρ_v : Densité de vapeur du carburant

- f) Angle d'inclinaison de la flamme

Deux méthodes sont disponibles. La première formule est la formule AGA [19] pour l'angle d'inclinaison ϕ

$$\phi = 0, \quad u_* \leq 1 \quad \text{(Équation IV.14)}$$

$$\phi = \arccos \left[\frac{1}{\sqrt{u_*}} \right], \quad u_* > 1 \quad \text{(Équation IV.15)}$$

La deuxième formule est introduite par Johnson [20]. Pour $u_a < 0.4$ m/s, l'angle d'inclinaison $\phi = 0$. Sinon, l'angle d'inclinaison ϕ est défini par l'équation suivante

$$\frac{\tan \phi}{\cos \phi} = A, \text{ avec } A = 0,7(R_g)^{0,119} (F_r)^{0,429} \quad (\text{Équation IV.16})$$

Ici le nombre de Reynolds Re et le nombre de Froude Fr sont donnés par :

$$R_g = \frac{u_a D}{\nu_a}, \quad F_r = \frac{u_a^2}{g D}$$

où est la vitesse du vent (m / s), D le diamètre de la flamme (m), la cinématique viscosité de l'air (m² / s), et g est l'accélération gravitationnelle (m / s²).

g) Puissance émissive E_f W/m²

$$E_f = E_m [1 - e^{-D/L_s}], \text{ FLMTYP}=0 \quad (\text{Équation IV.17})$$

$$= E_m [e^{(-D/L_s)}] + E_s [1 - e^{(-D/L_s)}], \text{ FLMTYP}=1 \quad (\text{Équation IV.18})$$

$$= \frac{\chi_R m \Delta H_c}{[1 + 4 \frac{H}{D}]}, \text{ FLMTYP}=2 \quad (\text{Équation IV.19})$$

Où E_m est la puissance émissive maximale pour les feux lumineux, E_s la puissance émissive de fumée et L_s une longueur caractéristique pour la décroissance de E_f .

Si les données expérimentales ne sont pas disponibles, l'équation ci-dessus pour un «incendie général» est utilisée. Cette équation est dérivée de la définition de la fraction radiative χ_R ; χ_R est le rapport de l'énergie totale rayonnée (de la surface de feu) à l'énergie totale libérée (de la zone de la nappe)

- la fraction radiative χ_R

$$\chi_R = \frac{\text{radiated energy}}{\text{released energy}} = \frac{(\text{flame surface}) \cdot (\text{surface emissive power})}{(\text{burn rate}) \cdot (\text{pool area}) \cdot (\text{heat of combustion})}, \quad (\text{Équation IV.19})$$

$$= \frac{[\frac{1}{4}\pi D^2 + \pi D H] E_f}{m [\frac{1}{4}\pi D^2] \Delta H_c} = \frac{[1 + 4 \frac{H}{D}] E_f}{m \Delta H_c}$$

IV.1.3. Explosion

Tous les VCE résultent de l'inflammation d'un nuage inflammable qui s'est formé à la suite du rejet d'une grande quantité de liquide ou de gaz de vaporisation inflammable d'un réservoir de stockage, d'une cuve de traitement ou de transport ou d'un pipeline.

Cependant, toutes ces versions ne mèneront pas nécessairement à un VCE. D'une manière générale, plusieurs conditions doivent être présentes pour qu'une explosion de nuage de vapeur avec surpression dommageable se produise.[21]

- *Premièrement*, le matériau libéré doit être inflammable et dans des conditions appropriées de pression ou de température. Des exemples de matériaux appropriés sont les gaz liquéfiés sous pression (propane, butane), les liquides inflammables ordinaires en particulier à des températures et / ou pressions élevées (cyclohexane, naphta) et les gaz inflammables non liquéfiés (méthane, éthène, acétylène).
- *Deuxièmement*, un nuage doit se former avant l'allumage (phase de dispersion). Si l'inflammation se produit instantanément à la sortie, une torchère - en elle-même causant des dommages localisés importants par rayonnement thermique - se produira. Cependant, il est peu probable que des pressions de souffle importantes causant des dommages importants se produisent. Si le nuage devait se former sur une période de

temps dans une zone de traitement et s'enflammer par la suite, les pressions de souffle se propageant loin du centre du nuage peuvent entraîner des dommages importants sur une vaste zone. Les retards d'allumage de une à cinq minutes sont considérés comme les plus susceptibles de générer une explosion de nuage de vapeur, bien que des incidents majeurs avec des retards d'allumage aussi bas que quelques secondes et supérieurs à 30 minutes aient été documentés.

- Troisièmement, une partie du nuage doit être dans la plage d'inflammabilité du matériau. Un nuage va-verse aura généralement trois régions - une région riche près du point de libération, une région maigre au bord du nuage et une région entre les deux qui se trouve dans la plage d'inflammabilité. Le pourcentage de nuage de vapeur dans chaque région varie en fonction de nombreux facteurs différents, notamment le type et la quantité de matière libérée, la pression à la libération, la taille de l'ouverture de libération (tous les termes sources), le degré de confinement du nuage, vent, humidité et autres effets environnementaux [22].
- Quatrièmement, les effets de souffle produits par les explosions de nuages de vapeur sont déterminés par la vitesse de propagation de la flamme.

IV.2. Modélisation des phénomènes dangereux liés aux transports de matières dangereuses par canalisation dans la région de Skikda

IV.2.1. Détermination des effets thermiques et surpressions

Pour mener à bien notre étude, nous avons besoin de déterminer les seuils des effets thermiques et les effets de surpressions des différents phénomènes dangereux résultants du transport par canalisation des différentes matières dangereuses transportées dans la région de Skikda.

IV.2.1.1. Les effets thermiques

Dans le but de modéliser les effets thermiques d'un incendie, il est nécessaire de déterminer les flux thermiques dégagés par cet incendie. Les flux thermiques sont calculés en fonction de la surface des flammes visibles, de la radiance émissive des flammes, de la position de la cible par rapport au mur de flammes ainsi que de la distance entre celui-ci et la cible.

L'évaluation des conséquences d'un incendie considère les zones suivantes :

Tableau IV.1 – Effets thermiques sur les bâtiments et l'usine aux niveaux des conséquences spécifiés [23]

Conséquence	Niveau de Conséquence	Effet sur les structures/personnel
Incendie instantané	Limite inférieure d'inflammable (LII)	Inflammation des matériaux facilement inflammables exposés, par exemple, événements de vapeur inflammable, plastiques, tissus, etc. Des incendies secondaires sont possibles mais improbables.
Feu de nappe/feu de gaz	100 kW/m ²	Charge de chaleur capable de provoquer la défaillance des structures en acier et de l'équipement après 30 minutes.

	37,5 kW/m ²	Assez pour endommager l'équipement. Décès immédiats
	12,5 kW/m ²	Energie minimum requise pour l'inflammation pilotée du bois, la fonte des tuyaux en plastique. Douleur extrême en 20 secondes et l'instinct pousse à la recherche d'un abri. Flux limite pour les incendies secondaires
	5 kW/m ²	Pas de dégâts aux bâtiments dans les constructions conventionnelles. Les personnes devraient pouvoir évacuer un bâtiment confronté à ce niveau de radiation thermique. Douleur ressentie sur la peau non protégée en 10 secondes. Valeur seuil en dessous de laquelle l'évacuation devrait toujours être possible.

IV.2.1.2. Les effets de surpressions

La modélisation consiste dans un premier temps à effectuer la dispersion du nuage de gaz inflammable, à définir la quantité de gaz susceptible d'exploser, à connaître les distances atteintes par le nuage explosible et, dans un deuxième temps, à calculer les distances correspondant aux surpressions engendrées par l'explosion du nuage.

Tableau IV.2 – Effets de surpressions sur les bâtiments et l'usine aux niveaux des conséquences spécifiés [23]

Conséquence	Niveau de Conséquence	Effet sur les structures/personnel
Explosion de nuage de vapeur	>500 mbar (7,3psi)	Dégâts à l'usine et aux vaisseaux d'exploitation, parfois substantiels avec une destruction totale probable au-dessus de 1 bar. Les bâtiments non renforcés seront démolis.
	300 mbar (4,4psi)	Seuil de dégâts significatifs aux vaisseaux d'exploitation et à l'installation de tuyauterie. Les bâtiments non renforcés seront probablement endommagés de façon significative ou partiellement détruits.
	150 mbar (2,2psi)	Dégâts à l'usine insignifiants sauf pour les structures faibles telles que des réservoirs de stockage atmosphériques vides. Il faut s'attendre à des dégâts structurels aux bâtiments de type domestique. Dégâts superficiels avec défaillance des murs non soutenus et bris de toutes les fenêtres. Seuil d'effondrement partiel pour les bâtiments à construction faible

	70 mbar (1psi)	Dégâts à l'usine improbables et uniquement de légers dommages superficiels aux bâtiments en brique. La majorité des vitres sont cassées et les débris de verre provoqueront certainement des blessures à quelques personnes dans le bâtiment. Explosion de nuage d vapeur
	30 mbar (0,45psi)	Verre brisé, mais pas de décès escomptés.

IV.2.2. Caractéristiques des canalisations étudiées

Plusieurs données sont nécessaires pour réaliser les études de modélisation des phénomènes dangereux par le logiciel PHAST [24], qui sont relatives aux paramètres physiques des canalisations étudiées ainsi que les conditions météorologiques.

Le tableau ci-dessous représente les caractéristiques physiques de canalisations étudiées, la température et la pression internes ainsi que le débit au sein de chaque canalisation. [25][26][27]

Tableau IV.3 – caractéristiques des canalisations de TMD dans la région de Skikda

Origine de la ligne	Produit	Diamètre de la canalisation (pouce)	Température interne (°C)	Pression interne (Bar)	Débit
HRM-RTE	Brut	OK.1 34''	35	45-80	2 800 (m ³ /h)
HRM-RTE	Gaz naturel	GK1 40'' GK2 42'' GK3 48''	30	55 55 70	173,8kg/s 236 kg/s
HRM-RTE	Condensat	NK1 30''	35	48	1585.3 (m ³ /h)
RTE-Ra2k	Condensat	24''	35	17	3000(m ³ /h)
Ra2k-Ra1k	Naphta	24''	40	8	1525(m ³ /h)
Ra2k-Ra1k	Kérosène	10''	40	8,7	225(m ³ /h)
Ra2k-Ra1k	Gasoil (Lourd/léger)	LGO – 10'' HGO – 4''	40	9 13	95(m ³ /h) 40(m ³ /h)
Ra2k-Ra1k	Butane	6''	40	19,2	60(m ³ /h)
Ra1K-depots Skikda	Essence	10''	45	12	380(m ³ /h)
Ra1K-	Gasoil	12''	45	12	540(m ³ /h)

depots Skikda					
------------------	--	--	--	--	--

IV.2.3. Détermination des données météorologiques

Ci-dessous les classes météorologiques retenues pour notre étude de modélisation

- D – stabilité neutre et vitesse du vent de 5 m/s. Typique des conditions en journée avec un vent et une couverture nuageuse forte, ce qui donne des turbulences moyennes.
- F – conditions stables et vitesse du vent de 1,5ms/s. Typiques des conditions nocturnes avec une couverture nuageuse moyenne lorsque les turbulences sont limitées et par conséquent, la dilution des nuages dispersés est limitée également.

Tableau IV.4. Classes météorologiques

	D- neutre	F- stable
Température	24	20
Vitesse du vent	5	1,5
Taux d'humidité	0.72	0.7

IV.2.4. Modélisation des phénomènes dangereux liés au transport du gaz naturel par canalisation

Pour modéliser les effets possible suite à une fuite sur une canalisation de transport de gaz naturel, il nous faut des données liées à la canalisation, des données externes comme des données météorologiques, nous avons pris en considération les données de la ligne GK2 pour effectuer notre modélisation, le tableau ci-dessous énumère tous ces paramètres :

Tableau IV.5 – Paramètres du scenario étudié (Gaz naturel)

Matériel	Gaz naturel (methane)
Diamètre	42''
Température interne	30 °C
Pression interne	50 bar
Taille de fuite	500 mm
débit da la canalisation	173,8kg/s

IV.2.4.1. Dispersion atmosphérique du Gaz naturel

La dispersion atmosphérique d'un produit rejeté accidentellement dépend essentiellement des caractéristiques de la source d'émission qui dépendent des conditions de la fuite, des conditions météorologiques comme la vitesse du vent, la stabilité de l'atmosphère, et l'état de du sol.

La dispersion du Gaz Naturel en cas de fuite accidentelle sur la canalisation est présentée par la distances à des concentrations LII et LSI pour des différentes classes météorologiques comme il est illustrés ci-dessous.

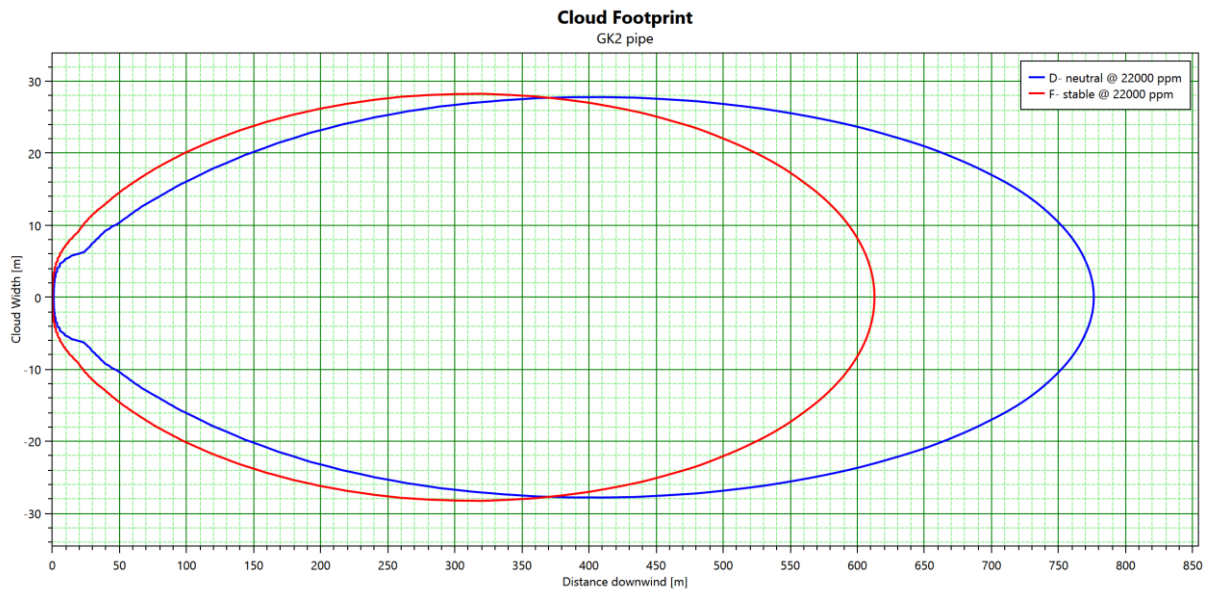


Figure IV.4. Étendue du nuage de dispersion du gaz naturel

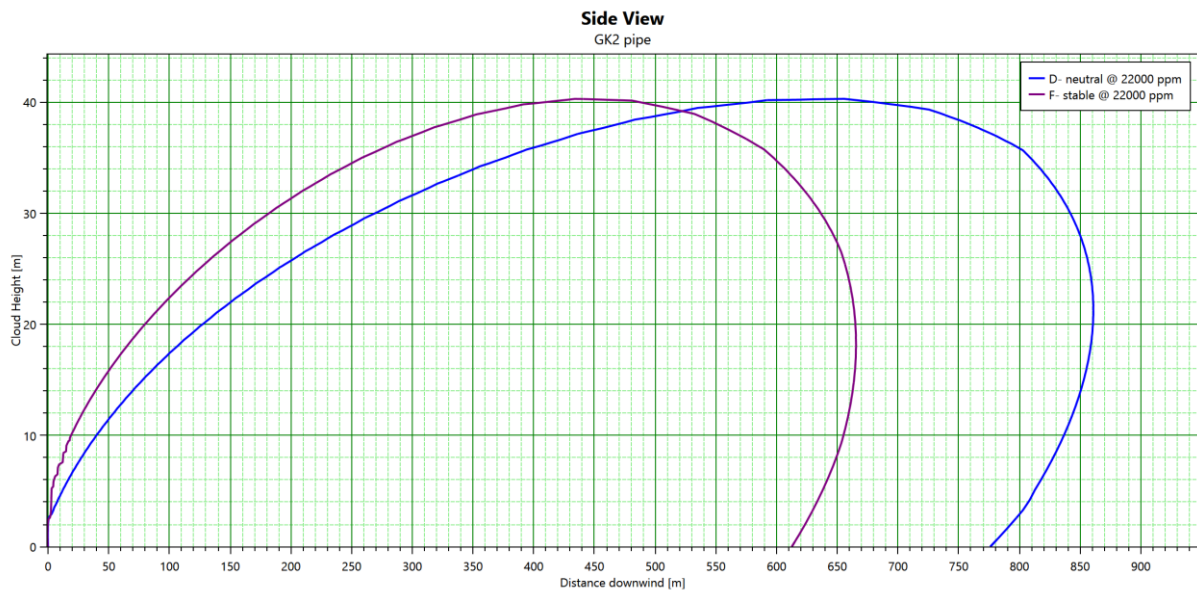


Figure IV.5. Vue latérale du nuage de dispersion du gaz naturel

Tableau IV.6 – La dispersion atmosphérique du gaz naturel en fonction des classes météorologiques

Classe météorologique	Distance à la limite LSI (m)	Distance à la limite LII (m)	Distance à la fraction LII (m)
D- neutre	83,2143	414,264	778,997
F- stable	88,9653	375,423	622,141

Le tableau IV.6 représente les distances de dispersion obtenue par rapport à la limite inférieure d'inflammabilité et la limite supérieure d'inflammabilité du gaz naturel.

On note que la classe météorologique joue un rôle important pour la dispersion atmosphérique, notamment la vitesse du vent, pour la classe d-neutre où la vitesse du vent est de 5m/s la distance est de 778.997 m, qui est plus grande que dans le cas de la classe f-stable. Le nuage de dispersion couvre une grande partie autour de la fuite qui se trouve dans une zone urbaine et proche du terminal rte, s'il y a explosion du nuage (vce) les dégâts seront considérables, du point de vue de pertes humaines et dégâts matériels.

IV.2.4.2. Feu de torche (Jet fire) du Gaz naturel

Suite à la fuite et en présence d'ignition, le feu de torche se produit. L'exploitation du logiciel PHAST permet de mesurer la longueur de la flamme. Les résultats sont résumés dans le tableau IV.7.

On note que dans la Classe D ou la vitesse du vent est supérieure à la classe F, la hauteur de flamme est supérieure à celle de la classe F.

La figure IV.6. représente l'intensité de radiation du feu de torche, sur les 02 classes météorologiques. A la montée du feu de torche, l'intensité des radiations atteint 350 kW/m².

Tableau IV.7 – Hauteur de la flamme du Feu de torche du Gaz naturel

Classe météorologique	Hauteur de la flamme [m]
D- neutre	225,775
F- stable	216,157

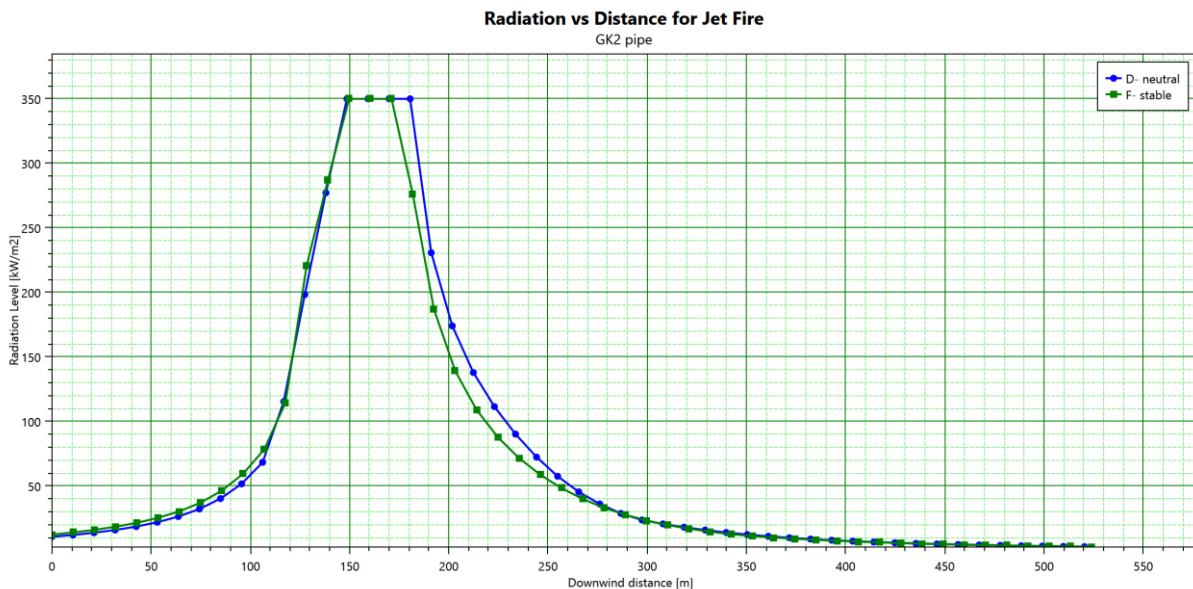


Figure IV.6. Distance et Intensité des radiations pour feu de torche du gaz naturel

IV.2.4.3. Feu de nuage (flash fire) du gaz naturel

Le Flash fire est le front de flamme d'un nuage de vapeur enflammé, ses dommages se limitent exclusivement à des effets thermiques. Il présente des dangers significatifs (mort) pour le personnel (tout personnel en extérieur pris dans l'enveloppe du flash).

Les conséquences potentiels de flash fire sont présentés sous la forme des zones tels qu'indiqués dans la Figure IV.4 (les parcelles des contours LII pour les deux classes météorologiques).

- La zone la plus dangereuse correspond à la classe D. C'est une zone létale avec une distance à la LII égale à 778,997.
- La catégorie F présente une distance de 622,141m à la limite LII

Le tableau IV.8 représente un résumé des distances à la LII, cité précédemment, les distances du flash fire maximum, ainsi que la hauteur de ce type de feu pour les deux classes météorologiques.

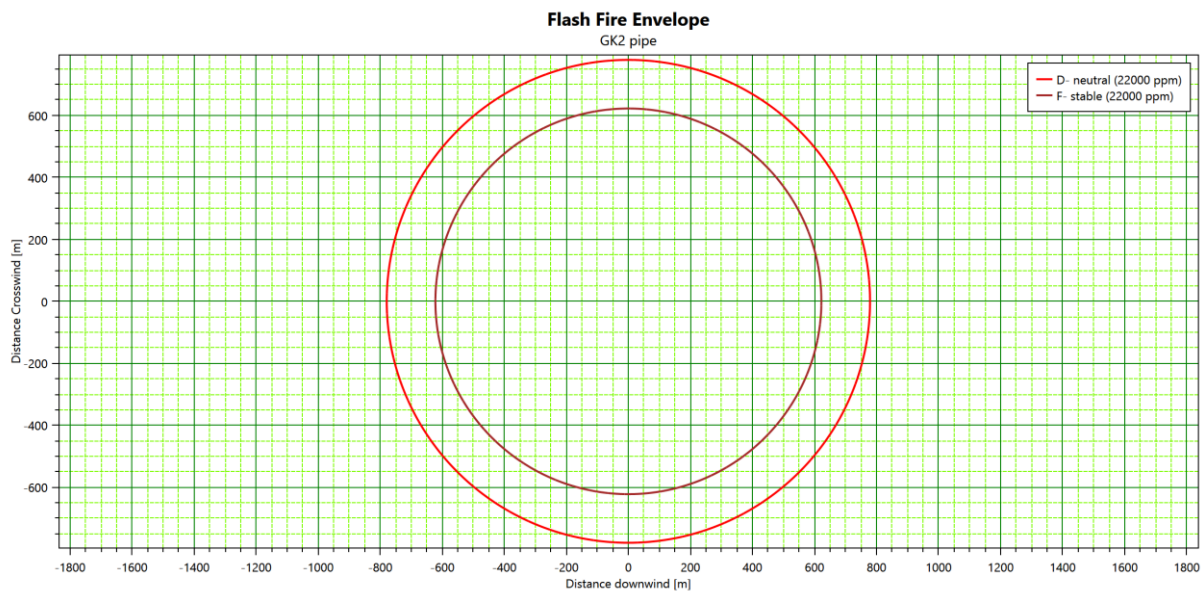


Figure IV.7. Enveloppe de flash fire du gaz naturel

Tableau IV.8 – Résultats relatifs au flash fire du gaz naturel, Distance sous le vent jusqu'aux concentrations définies

Classe météorologique	Distance à la limite LII [m]	Distance à la limite LII Fraction [m]	Distance du Max flash fire [m]	Hauteur du Max flash fire [m]
D- neutre	414,264	778,997	884,986	21,9763
F- stable	375,423	622,141	681,052	19,0016

IV.2.4.4. Explosion type VCE liée à la fuite du gaz naturel

L'explosion au niveau de la fuite de la canalisation est de type VCE. Elle est provoquée par un nuage de vapeur formé suite à la dispersion du GN. La modélisation de ce type d'explosion revient à faire l'estimation des niveaux des surpressions produits en fonction des différentes classes météorologiques sur 03 niveaux de surpressions (0,02068/0,1379/0,2068 bar).

Les résultats du tableau IV.9 indiquent que l'onde de surpression de 0,02068 bar a des conséquences et dégâts majeurs, qui peuvent s'étendre jusqu'à 1684,23 m pour la classe D et 1555,35 pour la classe F.

Tableau IV.9 – Résultats des effets de surpressions du VCE liés à la fuite du gaz naturel

Classe météorologique	Niveau de surpression [bar]	distance Maximale [m]	Diamètre [m]
D- neutre	0,02068	1684,23	1648,47
	0,1379	1020,2	320,39
	0,2068	980,108	240,216
F- stable	0,02068	1555,34	1790,68
	0,1379	834,015	348,031
	0,2068	790,47	260,94

IV.2.5. Modélisation des phénomènes dangereux liés au transport du condensat par canalisation

Pour modéliser les phénomènes dangereux liés à un accident sur une canalisation de condensat, nous avons pris en considération les données de la ligne de condensat (RTE-RA2k) d'un diamètre de 24" pouces pour effectuer notre modélisation, le tableau ci-dessous énumère tous ces paramètres :

Tableau IV.10 – Paramètres du scénario étudié (condensat)

Matériel	Condensate
Diamètre	24"
Température interne	35 °C
Pression interne	17 bar
Taille de fuite	300 mm
débit da la canalisation	833,33 kg/s

Dans cette canalisation, le condensat est sous forme liquide, comme c'est un produit extrêmement volatil, les résultats de la modalisation seront sur deux phases : liquide et gaz du condensat.

IV.2.5.1. Dispersion atmosphérique du condensat

La dispersion du condensat en cas de fuite accidentelle sur la canalisation est présentée par la distances à des concentrations LII et LSI pour des différentes classes météorologiques comme illustré sur la figure IV.8. On note aussi sur les deux figures IV.8 et IV.9 une présence d'une flaque du condensat qui est nettement stable sur les deux classes météorologiques.

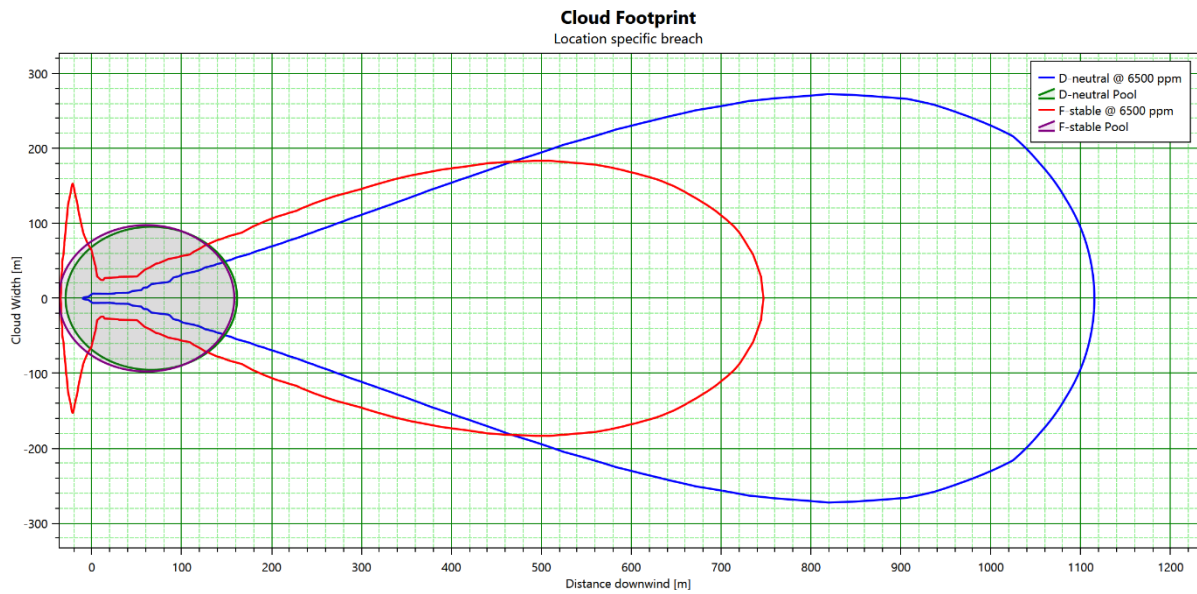


Figure IV.8. Étendue du nuage de dispersion du condensat

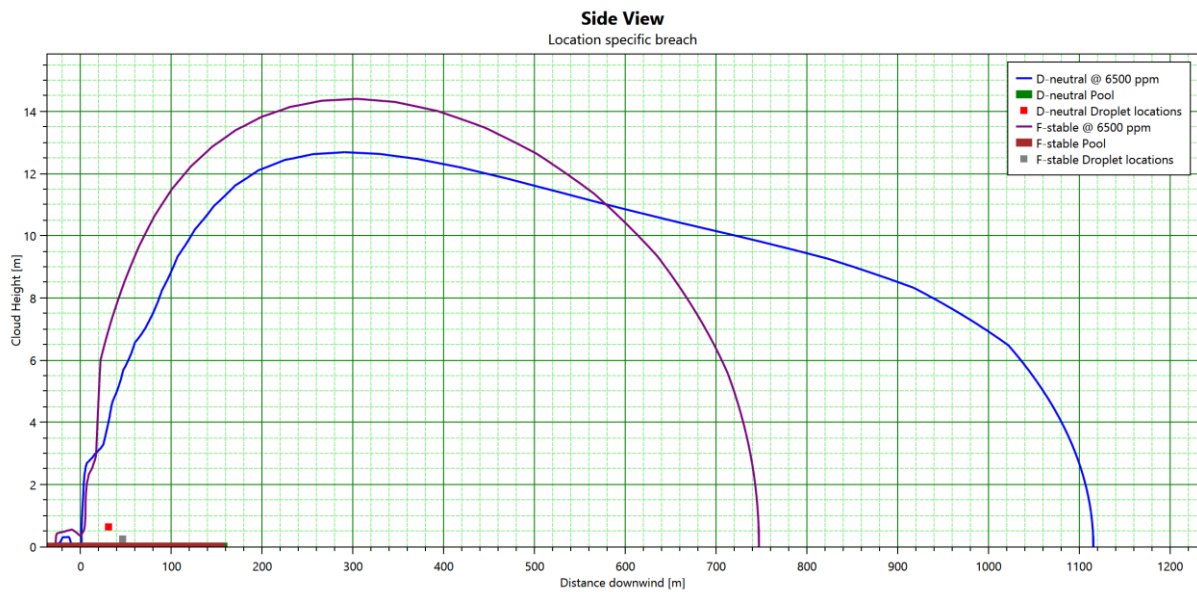


Figure IV.9. Vue latérale du nuage de dispersion du condensat

Tableau IV.11 – La dispersion atmosphérique du condensat en fonction des classes météorologiques

Classe météorologique	Distance à la limite LSI (m)	Distance à la limite LII (m)	Distance à la fraction LII (m)
D-neutre	145,088	878,914	1283,79
F-stable	203,797	601,74	912,236

Le tableau IV.11 représente les distances de dispersion obtenue par rapport à la Limite Inferieur d'inflammabilité et la Limite Supérieure d'Inflammabilité du condensat.

On note que la classe météorologique joue un rôle important pour la dispersion atmosphérique, notamment la vitesse du vent, pour la classe D-neutre où la vitesse du vent est de 5m/s la distance est plus grande que dans le cas de la classe F-stable.

Comme cette ligne est situé entre l'unité Ra2k et l'unité Ra1k, le nuage de dispersion couvre une grande partie autour de la fuite, s'il y a explosion du nuage (VCE) les dégâts seront considérables, du point de vue de pertes humaines et dégâts des installations aux alentours.

IV.2.5.2. Feu de torche (Jet fire) du condensat

Suite à la fuite et en présence d'ignition, le feu de torche se produit. Le logiciel PHAST, nous aides à mesurer la longueur de la flamme. Les résultats sont résumés dans le tableau IV.12.

On note que dans la Classe D ou la vitesse du vent est supérieure à la classe F, la hauteur de flamme est inférieur à celle de la classe F, donc quand il y a une vitesse de vent basse la flamme prend de la hauteur.

La figure IV.10. représente l'intensité de radiation du feu de torche, sur les 02 classes météorologiques.

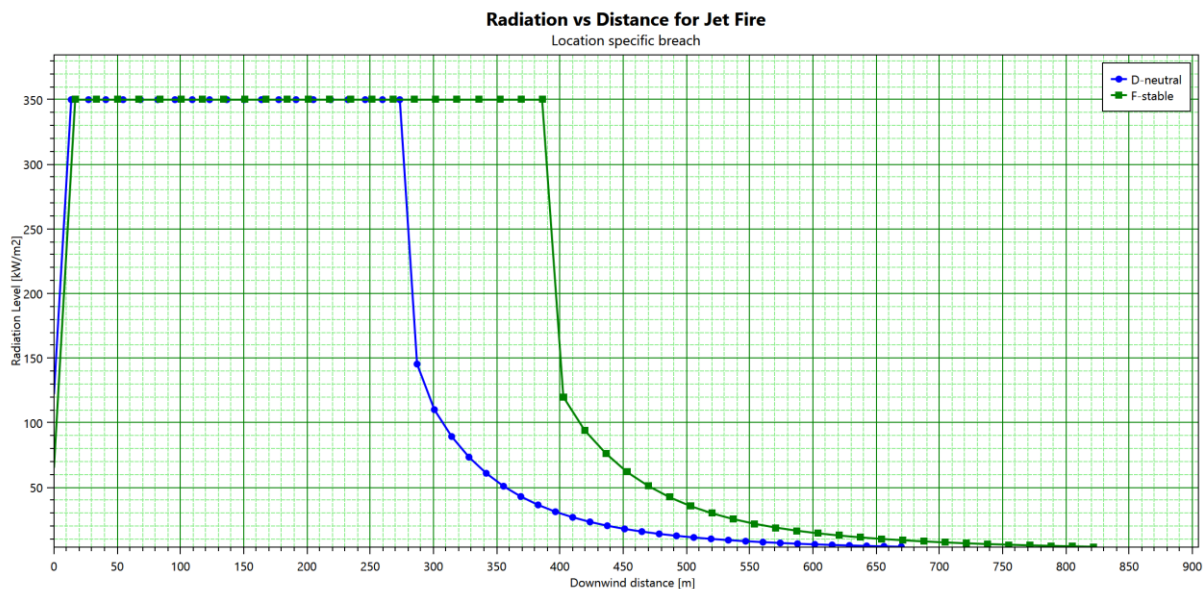


Figure IV.10. Distance et Intensité des radiations pour feu de torche du condensat

Tableau IV.12 – Hauteur de la flamme du condensat

Classe météorologique	Hauteur de la flamme [m]
D-neutre	277,906
F-stable	382,737

IV.2.5.3. Feu de nuage (flash fire) du condensat

Les événements et les conséquences potentiels du flash fire sont présentés sous la forme des zones tel qu'indiqué dans la Figure IV.11 (les parcelles des contours LII pour les deux classes météorologiques).

- La zone la plus dangereuse correspond à la classe D. C'est une zone létale avec une distance à la LII égale à 1283,79 m
- La catégorie F présente une distance de 912,236 m à la LII

Le tableau IV.13 représente un résumé des distances à la LII, cité précédemment, et aussi les distances du flash fire maximum.

L'enveloppe du flash fire touche à la fois les deux infrastructures des unités Ra2k et Ra1k, ce qui peut provoquer un effet domino et toucher d'autres installations à proximité, cette enveloppe du flash fire peut causer la mort de l'ensemble des travailleurs pris dedans.

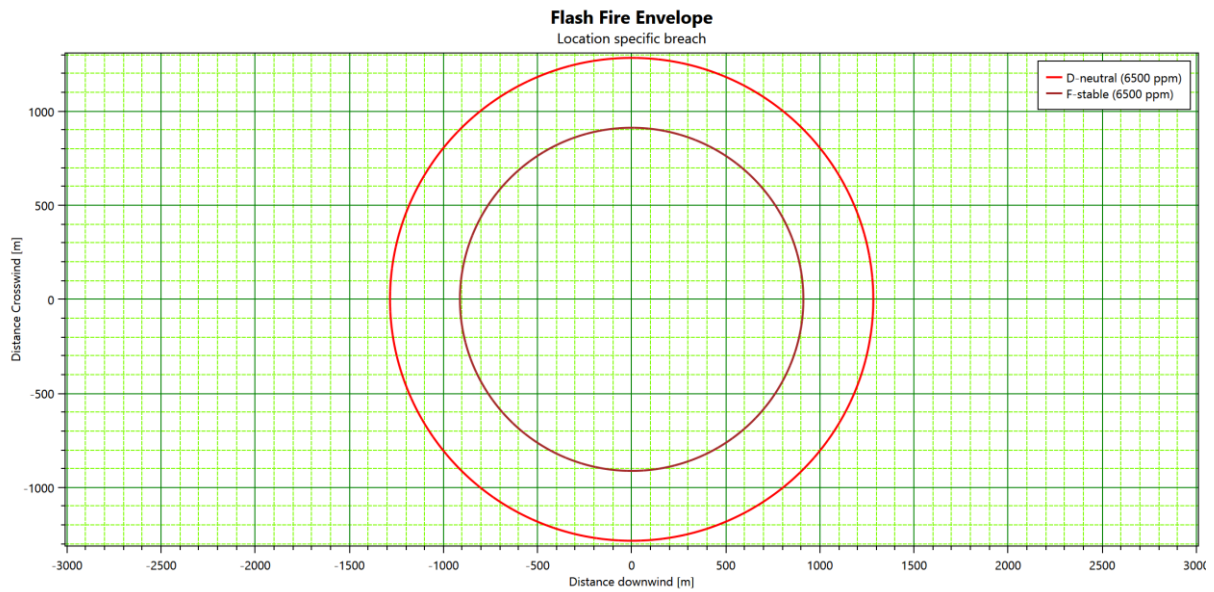


Figure IV.11. Enveloppe du flash fire du condensat

Tableau IV.13 – Résultats relatifs au flash fire du condensat, Distance sous le vent jusqu'aux concentrations définies

Classe météorologique	Distance à la limite LII [m]	Distance à la limite LII Fraction [m]	Distance du Max flash fire [m]
D- neutre	878,914	1283,79	1152,6
F- stable	601,74	912,236	916,869

IV.2.5.4. Feu de nappe (pool fire) du condensat

Suite à la fuite sur la canalisation du condensat, une flaque du produit se forme, ce qui conduit à un éventuel feu de nappe s'il y a présence de source d'ignition. Les conséquences du feu de nappe sont importantes et considérables à la fois pour les installations et le personnels. Plusieurs facteurs agissent sur la gravité de ces conséquences, parmi elles : les facteurs

atmosphériques qui jouent un rôle important sur le transfert des effets thermiques soit par conduction, soit par convection en fonction des vents et stabilité atmosphérique.

Le feu de nappe précoce (early pool fire) du condensat présente les paramètres illustrés dans le Tableau IV.14, le tableau IV.15 représente les paramètres du feu de nappe tardif (late pool fire).

Tableau IV.14 – Caractéristiques de l’early pool fire du condensat

Classe météorologique	diamètre [m]	Distance à l’intensité (12,5 kW/m²) [m]	Distance à l’intensité (37,5 kW/m²) [m]
D-neutre	110,415	174,734	147,738
F-stable	115,108	167,569	137,548

Tableau IV.15 – Caractéristiques du late pool fire du condensat

Classe météorologique	diamètre [m]	Distance à l’intensité (12,5 kW/m²) [m]	Distance à l’intensité (37,5 kW/m²) [m]
D-neutre	255,148	281,02	231,489
F-stable	279,47	280,804	228,172

IV.2.5.5. Explosion type VCE liée à la dispersion de condensat

L’explosion au niveau de la fuite de la canalisation est de type VCE est provoquée par un nuage de vapeur formé suite à la dispersion du condensat. La modélisation de ce type d’explosion revient à faire l’estimation des niveaux des surpressions produits en fonction des différentes classes météorologiques sur 03 niveaux de surpressions (0,02068/0,1379/0,2068 bar).

Les résultats du tableau IV.16 indiquent que l’onde de surpression de 0,02068 bar a des conséquences et dégâts majeurs, qui peuvent s’étendre jusqu’à 2475,49 m pour la classe D et 1973,86 m pour la classe F.

On note que le diamètre de l’explosion est supérieur à 2 km dans les deux classes météorologiques, donc l’onde de choc vas se propager jusqu’aux unités avoisinantes, conduire forcément à un effet domino et causer d’autres accidents.

Tableau IV.16 – Résultats des effets de surpressions du VCE liés à la dispersion de condensat

Classe météorologique	Niveau de surpression [bar]	distance Maximale [m]	Diamètre [m]
D- neutre	0,02068	2475,49	2730,97
	0,1379	1404,4	508,804
	0,2068	1344,24	388,485
F- stable	0,02068	1973,86	2447,73

	0,1379	1123,02	426,035
	0,2068	1072,64	325,289

IV.2.6. Modélisation des phénomènes dangereux liés au transport de butane par canalisation

Pour modéliser les phénomènes dangereux liés à un accident sur une canalisation du Butane (RA2k- Ra1k) de 6'' pouces pour effectuer notre modélisation, le tableau ci-dessous énumère tous ces paramètres :

Tableau IV.17 – Paramètres du scenario étudié (butane)

Matériel	Butane
Diamètre	6''
Température interne	40 °C
Pression interne	19 bar
Taille de fuite	76,2 mm
débit da la canalisation	16,67 kg/s

IV.2.6.1. Dispersion atmosphérique du butane

La dispersion du butane en cas de fuite accidentelle sur la canalisation est présentée par la distances à des concentrations LII et LSI pour des différentes classes météorologiques comme il est illustré ci-dessous, dans les deux figures IV.12 et IV.13. On note que l'étendue du nuage de dispersion dépasse les 400 m pour les deux classes météorologiques.

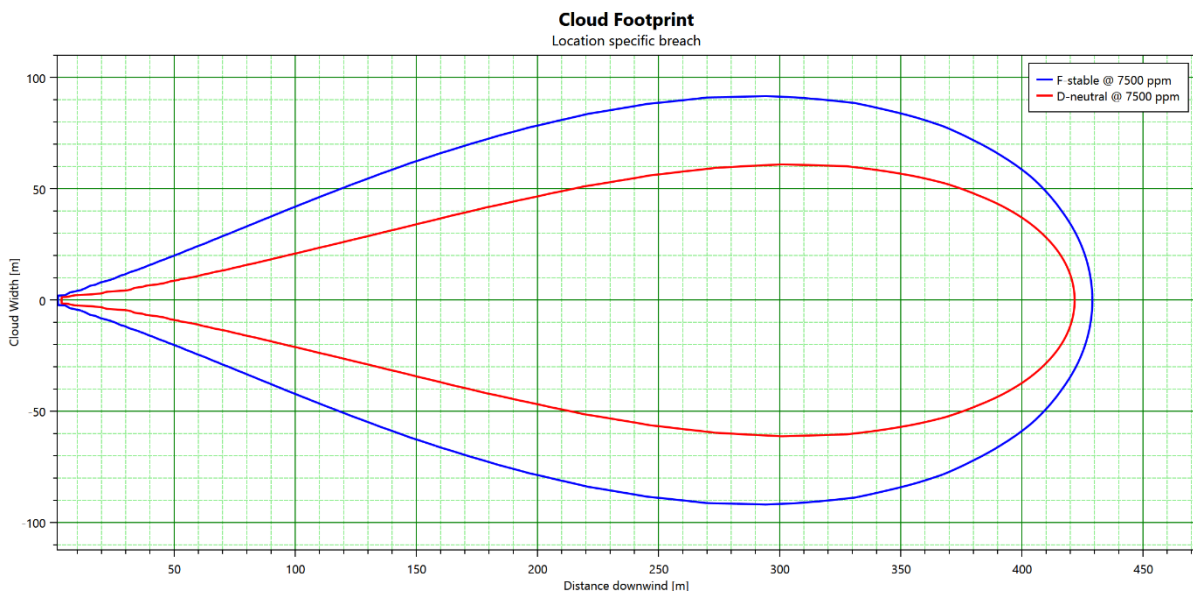


Figure IV.12. Étendue du nuage de dispersion du butane

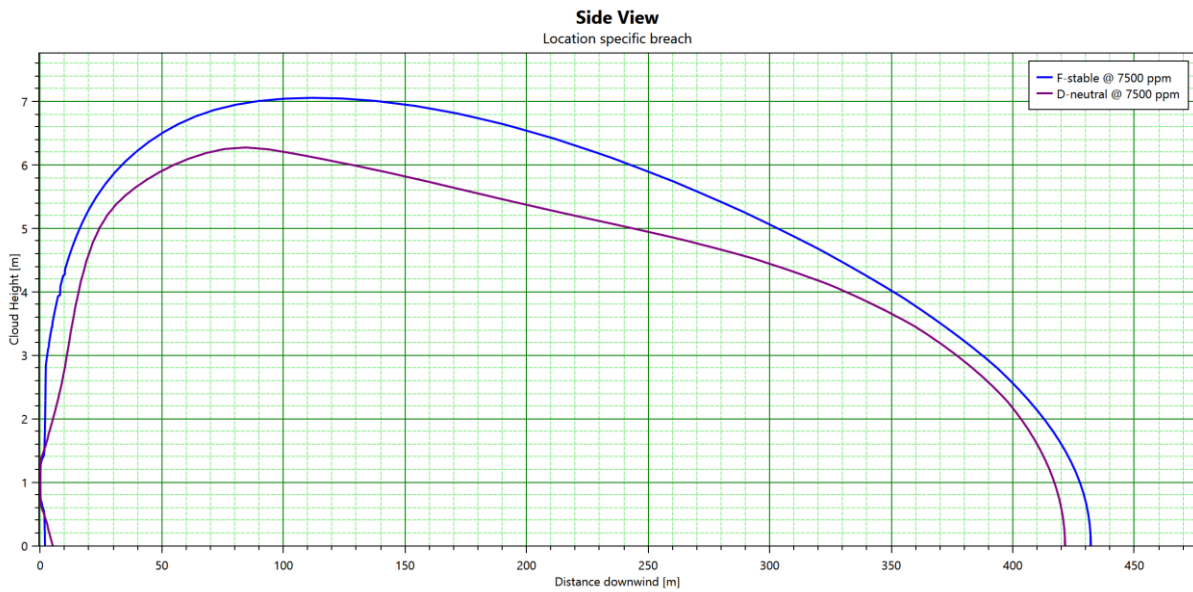


Figure IV.13. Vue latérale du nuage de dispersion du butane

Tableau IV.18 – La dispersion atmosphérique du butane en fonction des classes météorologiques

Classe météorologique	Distance à la limite LSI (m)	Distance à la limite LII (m)	Distance à la fraction LII (m)
D-neutre	32,4497	276,974	422,292
F-stable	35,6306	237,317	443,993

Le tableau IV.18 représente les distances de dispersion obtenue par rapport à la Limite Inferieur d'inflammabilité et la Limite Supérieure d'Inflammabilité du Butane.

Comme cette ligne est située entre l'unité RA2k et l'unité RA1k, le nuage de dispersion couvre une grande partie autour de la fuite, s'il y a explosion du nuage (VCE) les dégâts seront considérables, du point de vue de pertes humaines et dégâts des installations aux alentours.

IV.2.6.2. Feu de torche (Jet fire) du butane

Suite à la fuite et en présence d'ignition, le feu de torche se produit. Le logiciel PHAST, nous aides à mesurer la hauteur de la flamme du feu de torche. Les résultats sont résumés dans le tableau IV.19.

On note que la vitesse du vent joue un rôle important pour ce qui est de la hauteur de la flamme, moins il y a de vent plus la flamme prend de la hauteur comme le cas de la classe F ou la vitesse du vent est de 1,5 m/s et la hauteur de flamme est supérieure à la classe D.

La figure IV.14. représente l'intensité de radiation du feu de torche, sur les 02 classes météorologiques.

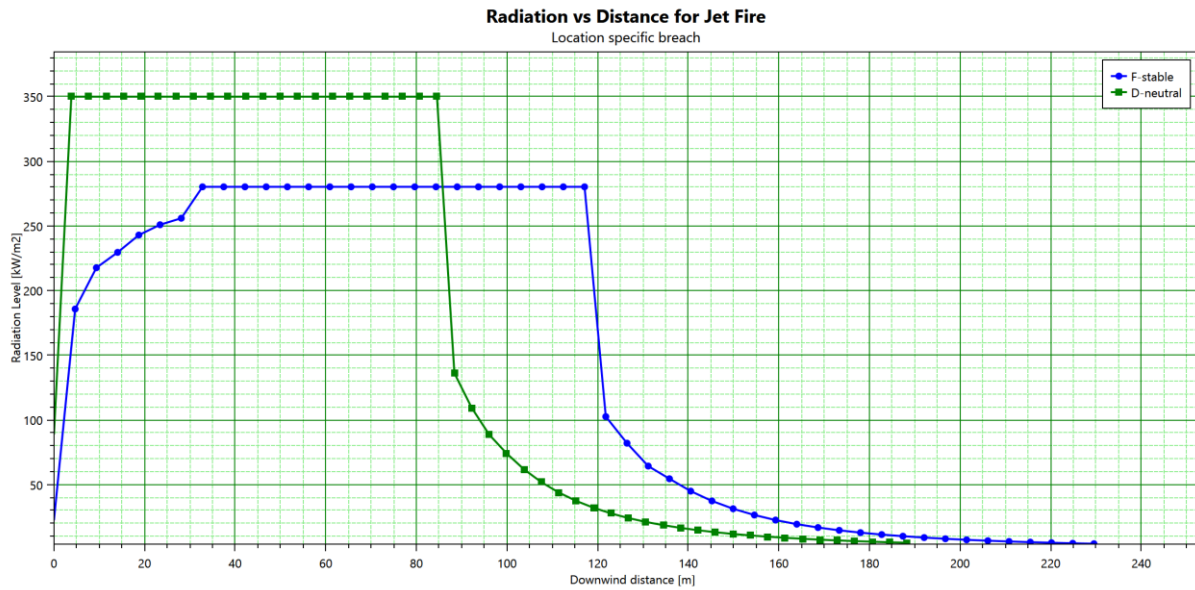


Figure IV.14. Distance et Intensité des radiations pour feu de torche du butane

Tableau IV.19 – Hauteur de la flamme du butane

Classe météorologique	Hauteur de la flamme [m]
D-neutre	84,2482
F-stable	116,028

IV.2.6.3. Feu de nuage (flash fire) du butane

Les événements et les conséquences potentiels de flash fire sont présentés sous la forme des zones tels qu'indiqués dans la Figure IV.15 (les parcelles des contours LII pour les deux classes météorologiques).

- La zone la plus dangereuse correspond à la classe F. C'est une zone létale avec une distance à la LII égale à 443,993 m
- La catégorie D présente une distance de 422,292 m à la LII

Le tableau IV.20 représente un résumé des distances à la LII, cité précédemment, et aussi les distances du flash fire maximum.

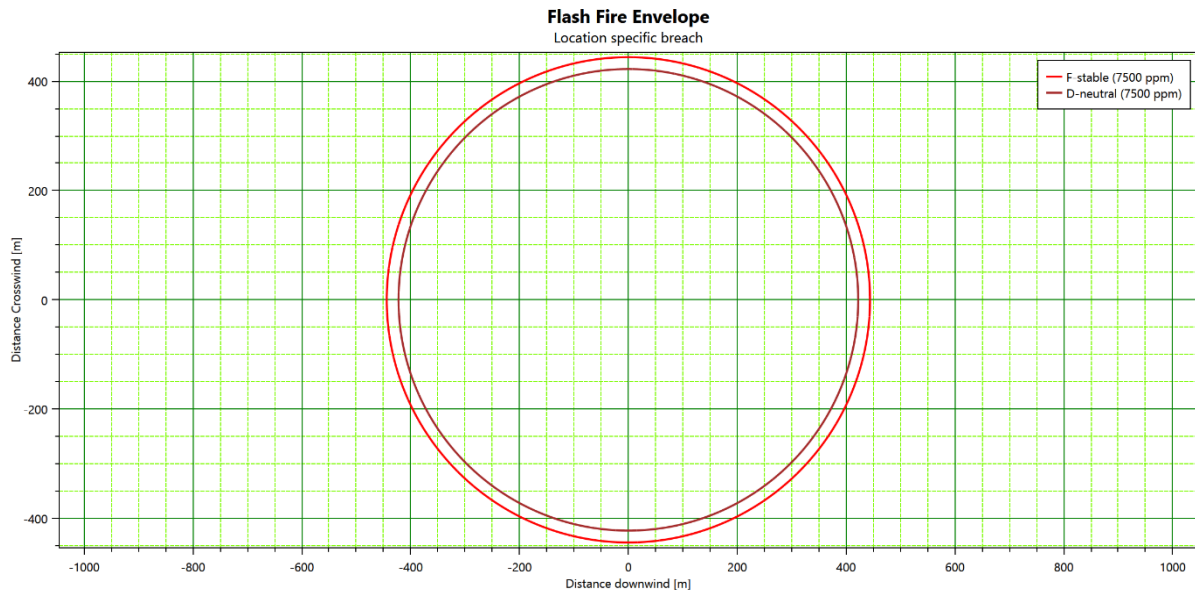


Figure IV.15. Enveloppe du flash fire du butane

Tableau IV.20 – Résultats relatifs au flash fire du butane, Distance sous le vent jusqu'aux concentrations définies

Classe météorologique	Distance à la limite LII [m]	Distance à la limite LII Fraction [m]	Distance du Max flash fire [m]
D- neutre	276,974	422,292	421,486
F- stable	237,317	443,993	442,144

IV.2.6.4. Explosion type VCE liée à la dispersion du butane

L'explosion au niveau de la fuite de la canalisation est de type VCE est provoquée par un nuage de vapeur formé suite à la dispersion du butane. La modélisation de ce type d'explosion revient à faire l'estimation des niveaux des surpressions produits en fonction des différentes classes météorologiques sur 03 niveaux de surpressions (0,02068/0,1379/0,2068 bar).

Les résultats du tableau IV.21 indiquent que l'onde de surpression de 0,02068 bar a des conséquences et dégâts majeurs, qui peuvent s'étendre jusqu'à 912,474 m pour la classe D et 984,689 m pour la classe F.

On note que le diamètre de l'explosion est supérieur à 1 km dans la classe météorologiques F, donc l'onde de choc vas se propager jusqu'aux unités avoisinantes et conduire forcément à un effet domino et causer d'autres accidents.

Tableau IV.21 – Résultats des effets de surpressions du VCE liés à la dispersion du butane

Classe météorologique	Niveau de surpression [bar]	distance Maximale [m]	Diamètre [m]
D- neutre	0,02068	912,474	984,947
	0,1379	515,716	191,431
	0,2068	491,764	143,528
F- stable	0,02068	984,689	1109,38
	0,1379	537,808	215,615
	0,2068	510,83	161,66

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à la modélisation des phénomènes dangereux possibles (identifiés dans le chapitre précédent) faisant suite à une perte de confinement, et ce en exploitant le logiciel PHAST.

Cette modélisation a été faite sur des canalisations de gaz naturel, condensat et butane ; ou chaque canalisation présente un scénario avec ses propres paramètres. Le logiciel utilisé nous a permis de modéliser la dispersion de chaque produit, les effets thermiques et effets de surpressions ainsi que leurs rayons et distances. Ces distances vont par la suite nous permettre de déterminer s'il y aura propagation des effets et dégâts sur les installations/unités avoisinantes.

Références bibliographique

- [1]. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006)- Ω -12, Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul), INERIS, 2002
- [2]. Circulaire du 10/05/10 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003 – Fiche n°2 : Phénomènes de dispersion atmosphérique
- [3]. Nishant PANDYA, Analyse de sensibilité paramétrique d'un outil de modélisation des conséquences de scénarios d'accidents - Application à la dispersion atmosphérique de rejets avec le logiciel Phast, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009
- [4]. HARPER, UDM Theory Document, DNV Software, Londres, UK. 2018
- [5]. Witlox, H. W. M., UDM Theory validation Document, DNV Software, Londres, UK. 2017
- [6]. INERIS-DRA-16-133610-06190A. Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (EAT-DRA-76)- Les explosions non confinées de gaz et de vapeurs - Ω UVCE, INERIS, 2016
- [7]. Raj et al. On the burning of large flammable vapor cloud Paper presented at the Joint Technical Meeting of the Western and Central States Section of the Combustion Institute. San Antonio, TX. (1975)
- [8]. INERIS-DRA-03-46055. Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques accidentels (DRA-35), Ω -8- Feu torche, INERIS, 2003
- [9]. H.C. Hottel, W.R. Hawthorne. Diffusion In Laminar Flame Jets, 3rd Symposium on Combustion, Flame and Explosions, pp. 254-266, 1949
- [10]. W.R. HAWTHORNE, D.S. WEDDELL, H.C. HOTTEL, MIXING AND COMBUSTION ON TURBULENT GAS JETS, 3rd Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 266-288, 1949
- [11]. T.A. Brzustowski, Predicting Radiant Heating From Flares, Esso Engineering Research and Development Report, EE 15ER.71, 1971
- [12]. T.A. Brzustowski, A New Criterion For The Length Of A Gaseous Turbulent Diffusion Flame, Comb. Sci. And Tech., 6, pp. 313-319, 1973
- [13]. American Petroleum Institute Guide For Pressure Relieving An Depressing Systems API Recommended Practice, 1997
- [14]. Xu. Y, Witlox, H, JFSH Jet Fire Model Theory Document, DNV Software, Londres, UK. 2015
- [15]. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006)- Ω -2, Feu de nappe, INERIS, 2002
- [16]. Cook, J., Bahrami, Z., and Whitehouse, R.J., "A comprehensive program for calculation of flame radiation levels", Proceeding of First Int. Conf. on Loss of Containment, London, UK (1989) , J. Loss Prev. Process Ind. 3, pp. 150-155 (1990)
- [17]. Mudan, K.S., "Fire hazard calculations for large open hydrocarbon fires", Section 3-11 in "SFPE handbook of fire protection engineering", Second Edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA (1995)
- [18]. Thomas, P.H., "The size of flames from natural fires", 9th Int. Combustion Symposium, Comb. Inst., Pittsburgh, PA, pp. 884-859 (1963)
- [19]. American Gas Association (AGA), "LNG safety research program", Report IS-3-1 (1974)
- [20]. Johnson, A. D. "A model for predicting thermal radiation hazards from large-scale LNG pool fires", IChemE Symp. Series 130, pp. 507-524 (1992)

- [21]. INERIS DRA - YMo/YMo - 1999 - 20433 Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre (Rapport final)
- [22]. Hanna S.R. and Drivas P.J., Guidelines for use of Vapor Cloud Dispersion Models, Center for Chemical Process Safety – American Institute of Chemical Engineers, (1987).
- [23]. Report No. EV-EDD-G40-001.Rev.GNLSkikda GNL.2K1. 21 Février 2011
- [24]. Logiciel DNV GL PHAST, version 8.22
- [25]. Fiche technique NK1, OK1, GK1, GK2, GK3, document SONATRACH – RTE, 2016
- [26]. Manuel d'opération U100, document SONATRACH-RA2K, 28/02//2009
- [27]. Fiches techniques ligne 10''-12''SKIKDA/12''KHROUB/12''BERRAHAL, Documents NAFTAL-CBR

*Conclusion générale
et Perspectives*

Conclusion générale

L'objectif majeur du transport sûr et sécurisé des matières dangereuses est la réduction des incidents pouvant entraîner un rejet ou une mauvaise utilisation. À ce jour, les réalisations en matière de sécurité sont le résultat de réglementations, de normes de l'industrie, d'initiatives individuelles des entreprises, de préparation aux interventions d'urgence, ainsi que des investissements dans la formation, les systèmes et la technologie. Même avec une bonne gestion du TMD, le transport sécurisé des matières dangereuses est complexe en raison d'un certain nombre de problèmes tel que la réglementation qui varie selon le mode de transport/la région/ le pays, les différentes classes de dangers. C'est pourquoi il est nécessaire de mener des études sur les risques liés à différents accidents de TMD et propres aux contextes concernés. Cette problématique revêt une importance capitale notamment dans la région de Skikda qui a une grande activité de production et de transports des hydrocarbures et leurs dérivés.

Ce travail de recherche nous a permis tout d'abord d'introduire les notions de bases relatives au risque et à la gestion des risques, de présenter les matières dangereuses en les définissant et classifiant mais également en considérant leurs modes de transport. Nous avons également passé en revue les méthodes et outils d'analyse des risques tout en mettant évidences celles qui sont utilisées dans notre travail, la méthode Nœud Papillon et la méthode STPA.

Afin de contextualiser le travail, nous avons répertorié les différentes matières dangereuses transportées dans la région de Skikda. Ces matières dangereuses ont été classées en fonction de leurs modes de transport, leurs états physiques et leurs itinéraires. Une description des modes de transport (ferroviaire, routier, canalisation), fréquemment utilisés dans cette région, nous a permis d'élaborer des statistiques concernant le transport par voie ferroviaire, avoir des caractéristiques de quelques canalisations pour le transport des hydrocarbures et leurs dérivés... etc. Toutes ces données nous ont permis de réaliser une étude sur les risques liés au transport de matières dangereuses dans la région de Skikda. Puis nous avons procédé à une étude qualitative, en utilisant une analyse préliminaire des risques combinée avec la méthode nœud papillon, pour identifier les causes, les conséquences ainsi que les phénomènes dangereux liés au transport par canalisation de certaines matières dangereuses transportées par les entreprises : RTE, Ra2K et NAFTAL dans la région de Skikda.

Nous avons par la suite modélisé les phénomènes dangereux, identifiés précédemment, ce qui nous a conduits à comparer ces résultats avec les seuils des effets thermiques et les seuils des effets de surpression liés aux différents types d'incendies et explosions identifiés. Cette

comparaison nous a permis d'avoir une vision sur l'étendue et l'ampleur des dégâts infligés aux installations limitrophes et riverains, cela va aider à la mise en place de moyens préventifs et protectifs afin de limiter l'envergure de ces phénomènes dangereux.

Perspectives

Afin de poursuivre l'analyse et l'évaluation des risques liés aux transports de matières dangereuses dans la wilaya de Skikda, nous pourrions nous focaliser sur les études d'évaluations quantitatives des risques (EQR), dont l'objectif est de déterminer le risque individuel et le risque sociétal par rapport à un individu ou une fraction de population qui sont susceptible de mourir des effets d'un accident lié aux TMD, ou encore déterminer le risque d'atteinte à l'environnement.

Nous pourrions aussi aborder l'analyse et l'évaluation du transport de matières dangereuses en fonction d'autres modes de transport tels que le transport par voie ferroviaire, routière ou maritime.

Publication