

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar – Annaba
Faculté des Sciences de l'Ingéniorat



جامعة باجي مختار – عنابسة

كلية علوم الهندسة

قسم الالكتروميكانيك

Département Electromécanique

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat LMD

Filière: Electromécanique

Spécialité : Sécurité industrielle

Par :

HAMMOUYA Amel

Thème :

**Contribution à l'amélioration des barrières de sécurité dans
un système industriel**

Thèse soutenue le 07 Octobre 2021 devant le jury composé de :

01	HAMAIDI Brahim	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	KABOUCHE Abdallah	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	HADJADJ AOUL Elias	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
04	BENIDIR Mohamed	Prof.	Université Constantine 1- Constantine	Examineur
05	INNAL Fares	Prof	Université 20 Aout 1955- Skikda	Examineur
06	CHAIB Rachid	Prof	Université Constantine 1- Constantine	Invité

Contribution à l'amélioration des barrières de sécurité dans un système industriel

Résumé :

Le stockage des hydrocarbures est une étape très importante parmi les étapes d'utilisation de ces produits. Les accidents liés à ce mécanisme sont parmi les plus dangereux du secteur industriel en raison de l'étendue de la zone de danger et de la grandiosité des pertes qui en résultent (Dégâts corporels, matériels et environnementaux). Par conséquent, le développement et la mise à niveau du système de sécurité des réservoirs de stockage sont d'une grande importance pour éviter ces risques. Ce travail a pour but d'analyser le système de sécurité des bacs de stockage et ses barrières constitutives, pour un éventuel développement de ce système. Pour atteindre les objectifs souhaités de cette recherche, des limites de l'expérience réelle et des difficultés auxquelles nous sommes confrontés dans la mise en œuvre de nos perspectives sur le terrain, nous avons fait appel à de nombreux outils pour nous ajuster à l'approche expérimentale, à savoir : SADT, BORA, arbre des conséquences, ALOHA et SolidWorks. Dans un premier temps, les risques liés au stockage des hydrocarbures et les barrières de différentes formes de réservoirs de stockage ont été présentés. Ensuite, une critique a été formulée sur le système algérien d'un point de vue technique, humain et organisationnel, pour ensuite ôter le rôle du facteur humain, ainsi que la relation entre les améliorations du système et le nombre et la gravité des accidents. Une attention particulière a été apportée à la barrière de vidange dans ce travail, où nous avons étudié son effet sur le système de sécurité sujet, l'environnement du bac et le réservoir lui-même. Enfin, nous avons proposé un modèle développé pour le processus de vidange. L'originalité de ce modèle réside dans l'utilisation de la loi universelle de la gravitation pour vider le réservoir principal dans un autre réservoir souterrain considéré comme cuvette éloignée sans aucune énergie supplémentaire. Cela permet de garantir l'évacuation en douceur et en toute sécurité du liquide stocké. Pour validation, cette proposition a été vérifiée et comparée aux autres modèles utilisés à cet effet.

Mots clé : système de sécurité, barrière, vidange, facteur humain, bac de stockage, hydrocarbure

Contribution to the improvement of safety barriers in an industrial system

Abstract:

The hydrocarbon storage is a very important step in the use of these products. Accidents related to this mechanism are among the most dangerous in the industrial sector due to the large danger zone and the resulting significant losses (corporal, material and environmental damage). Therefore, the storage tank safety system development and upgrading is of great importance to avoid these risks. This work aims to analyse the storage bin safety system and its constituent barriers, for a possible development of this system. In order to achieve the desired objectives of this research, the limitations of the real experiment and the difficulties faced in the implementation of our perspectives in the field, many tools were used to adapt to the experimental approach, namely: SADT, BORA, consequence tree, ALOHA and SolidWorks. Firstly, the risks related to the hydrocarbon storage and the different forms of storage tanks barriers were presented. Next, a criticism was formulated on the Algerian system in terms of technique, human and organisation aspects, to then extract the role of the human factor, as well as the relationship between system improvements to the number and severity of accidents. Particular attention was paid to the emptying barrier, where its effect on the subject safety system, the tank environment and the tank itself was studied. Finally, a model was developed for the emptying process. The originality of this model resides in the use of the universal law of gravitation to empty the main tank into another underground tank considered as a remote basin without any additional energy. This ensures that the stored liquid is drained smoothly and in complete safety. For validation, this proposal was checked and compared with other models used for this purpose.

Key words: safety system, barrier, emptying, human factor, storage tank, hydrocarbon

المساهمة في تحسين حواجز السلامة في نظام صناعي

ملخص:

يعتبر تخزين المنتجات الهيدروكربونية مرحلة مهمة للغاية من بين مراحل استغلال هذه المواد. وتعد الحوادث المرتبطة بهذه الآلية من أخطر الحوادث في القطاع الصناعي بسبب منطقة الخطر الكبيرة والخسائر الجسيمة التي تنتج عنها (أضرار جسدية ومادية وبيئية). لذلك ، فإن تطوير وتحديث نظام سلامة صهاريج التخزين له أهمية كبيرة لتجنب هذه الأخطار. يهدف هذا العمل إلى تحليل النظام الأمني لصهاريج التخزين والحواجز المكونة له ، في مسعى لتطويره. لتحقيق الأهداف المرجوة من هذا البحث وبسبب قيود التجربة والصعوبات التي واجهناها في تنفيذ أفكارنا في هذا المجال، استخدمنا العديد من الأدوات للتكيف مع النهج التجريبي ، و التي منها كل من طريقة: SADT ، BORA ، و شجرة النتائج (AdE) ، و برنامجي ALOHA و SolidWorks. أولاً، تم عرض المخاطر المرتبطة بتخزين الهيدروكربونات وحواجز مختلف الخزانات. ثم تمت صياغة نقد للنظام الجزائري من الناحية التقنية والبشرية و التنظيمية ، و من ثمة تم استخلاص دور العامل البشري ، وكذلك العلاقة بين تحسينات النظام وعدد الحوادث وخطورتها. تم إيلاء اهتمام خاص لحاجز التصريف في هذا العمل، حيث قمنا بالتحقيق في تأثيره على نظام أمان ومحيط الخزان والخزان في حد ذاته. أخيراً ، اقترحنا نموذجاً تم تطويره لعملية التفريغ. تكمن أصالة هذا النموذج في استخدام القانون العالمي للجاذبية لتفريغ الخزان الرئيسي في خزان آخر تحت الأرض باعتباره حوضاً بعيداً دون الحاجة لأي طاقة إضافية. مما يساعد على ضمان التفريغ السلس والأمن للسائل المخزن. و للتحقق من صحة هذا الاقتراح تم فحصه ومقارنته بالنماذج الأخرى المستخدمة لهذا الغرض.

الكلمات المفتاحية: نظام السلامة ، الحاجز ، التفريغ ، العامل البشري ، خزان التخزين ، الهيدروكربونات

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de génie électromécanique (LGEM), au Département d'électromécanique de l'université Badji Mokhtar Annaba. Mes remerciements avant tout à *ALLAH*, qui m'a donné des *parents* qui ont cru en moi, m'ont fait confiance et ont été la lumière qui a éclairé mon chemin, et qui m'a donné la volonté et la patience pendant toutes ces années pour que je puisse atteindre mes objectifs Elhamdulillah.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur *KABOUCHE Abdellah*, professeur à l'Université Badji Mokhtar, Annaba, pour son encadrement, ces conseils, sa disponibilité et son aide durant ces années. Il reçoit ici l'expression de mon profond respect et de toute ma reconnaissance.

Monsieur *CHAIB Rachid*, professeur à l'Université Constantine1, Constantine, est grandement remercié pour les nombreuses discussions qui ont contribué à la réussite de cette thèse. Pour son aide inestimable, sa patience et son encouragement. Son compétence a été un atout indéniable à la réussite de ce travail et m'ont permis d'apprendre énormément durant ces années de collaboration.

Je tiens à remercier également les membres du Jury. Plus particulièrement, Monsieur *HAMAIDI Brahim*, Professeur de l'université Badji Mokhtar, Annaba, et le directeur du laboratoire (LGEM), d'avoir présidé ce Jury, ainsi que pour ses conseils, ses orientations et surtout pour ses encouragements. Je lui exprime mon profond respect et mes vifs remerciements.

Le Professeur *HADJADJ AOUL Elias* de l'université Badji Mokhtar, Annaba, le Professeur *BENIDIR Mohamed*, et le Professeur *Rachid CHAIB* de l'université de Constantine 1 et le Professeur *INNAL Fares* de l'université 20 août 1955, Skikda, d'avoir pris la lourde charge d'expertiser le contenu de ce manuscrit.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance à Monsieur *HEROUS Lazhar*, Professeur de l'université Badji Mokhtar, Annaba, Monsieur *CHAHAOUI Oualid* et Monsieur *BOULAHROUZ Salim*, docteurs et Maitres de conférence de l'université Abbes Laghrour Khenchela, pour leurs conseils, remarques et encouragements.

Mes remerciements vont également : à l'ensemble de mes enseignants de l'université Badji Mokhtar, Annaba (département électromécanique et mécanique), et à leurs staff administratif, en particulièrement madame *MNIGUED Saida* et mademoiselle *HAMAIZIA Fatma zohra pour* leurs encouragements dans les moments difficiles.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur *BENKARANE Mohamed*, ingénieur en hygiène et sécurité industrielle (université de Batna) et superviseur intervention HSE en SH/DP CIS Hassi Messaoud pour sa générosité à fournir des informations, ses judicieux conseils et sa patience.

Mes plus sincères remerciements sont réservés aux personnes les plus importantes de mon univers Ma Famille.

A Sadreddine mon cher père et à mon adorable mère ;

A mes frères Abdellhak et Shaker ellah ;

A tous ceux qui ont besoin de ce modeste travail ;

En espérant être à la hauteur de leurs attentes.

TABLE DES MATIERES

RESUME

ABSTRACT

ملخص

REMERCIEMENT

DEDICACE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES EQUATIONS

PRINCIPALES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre 1. Généralité sur les bacs de stockage.....	7
1.1. Introduction.....	8
1.2. Généralité sur l'hydrocarbure.....	8
1.2.1. Définition des hydrocarbures	8
1.2.2. L'Origine des hydrocarbures	9
1.2.3. Composition des hydrocarbures	9
1.2.3.1. Les hydrocarbures aliphatiques	9
1.2.3.2. Les hydrocarbures naphthéniques	10
1.2.3.3. Les hydrocarbures aromatiques	10
1.2.4. Description de certains hydrocarbures courants.....	10
1.2.4.1. Pétrole brute	10
1.2.4.2. Méthane	11
1.2.4.3. Propane	11
1.2.4.4. Butane	11
1.2.4.5. Benzène	12
1.2.4.6. Kérosène	12
1.2.4.7. L'essence	12
1.2.5. Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures	12
1.2.5.1. La densité	13
1.2.5.2. Les limites d'inflammabilité (explosivité)	13
1.2.5.3. Point d'éclaire	14
1.2.5.4. Température d'auto-inflammation	14
1.2.5.5. Point critique	14
1.2.5.6. Température d'ébullition	15
1.2.5.7. Pression de vapeur	15
1.2.5.8. Les Propriétés de quelques produits hydrocarbonés	15
1.3. Le stockage des hydrocarbures	16
1.3.1. L'importance de stockage	16
1.3.2. Les bacs de stockage	17
1.3.3. Classification des réservoirs.....	17
1.3.3.1. Classification des réservoirs selon le critère de pression... ..	17
1.3.3.2. Classification des réservoirs selon la position par rapport	

au sol	18
1.3.3.3. Classification des réservoirs selon les formes de stockage.....	18
1.3.4. Le choix d'un bac de stockage	23
1.4. Conclusion	24
Chapitre 2. Les risques de stockage des hydrocarbures	25
2.1. Introduction	26
2.2. Notion de base	26
2.2.1. La sécurité	26
2.2.2. Système	27
2.2.3. Système de sécurité	27
2.2.4. Danger et risque	27
2.2.4.1. Danger	28
2.2.4.2. Risque	28
2.2.4.3. Relation entre danger et risque	29
2.2.5. Classification du risque	30
2.2.5.1. Risque acceptable	31
2.2.5.2. Risque inacceptable	31
2.2.5.3. Risque majeur	31
2.3. Étude de danger	31
2.4. Management des risques	32
2.5. Analyse des risques	33
2.5.1. Outil d'analyse les risques	34
2.5.1.1. Simulation et Modélisation pour l'analyse de risques	34
2.5.1.2. Les modèles d'analyse de risque	36
2.5.1.2.1. <i>Approche fonctionnelle</i>	36
2.5.1.2.2. <i>Approche systémique</i>	37
2.5.1.3. Les méthodes d'analyse des risques dédiée aux barrières de sécurité	37
2.5.1.3.1. <i>L'Arbre de défaillance (AdD)</i>	37
2.5.1.3.2. <i>Arbre d'événement</i>	39
2.5.1.3.3. <i>Nœud de papillon</i>	39
2.5.1.3.4. <i>La méthode BORA</i>	40
2.5.1.3.5. <i>Analyse des modes des défaillances et effets (AMDE)</i>	41
2.5.1.3.6. <i>La méthode LOPA</i>	42
2.5.1.3.7. <i>Les approches d'évaluation de la fiabilité humaine</i>	42
2.6. Réduction de risque	43
2.7. Les risques liés au bac de stockage	44
2.7.1. Dégradation et défaillance des bacs de stockage	44
2.7.1.1. Corrosion	44
2.7.1.2. Tassement	45
2.7.1.3. Fissure	46
2.7.1.4. Déformation	46
2.7.2. Rejet des hydrocarbures	46
2.7.3. Incendie	47
2.7.3.1. Jet de feu	48
2.7.3.2. Feu de nuage	48
2.7.3.3. Feu de nappe (POOLFIRE)	48

2.7.4.	Explosion	49
2.7.4.1.	BOILOVER	49
2.7.4.2.	BLEVE	50
2.7.4.3.	La pressurisation	50
2.7.4.4.	Explosions de nuage inflammable (UVCE)	51
2.7.4.5.	ROLLOVER	51
2.7.5.	Les causes et conséquences des risques liés au bac de stockage	51
2.8.	Conclusion	53
Chapitre 3.	Etude et analyse des barrières de sécurité	55
3.1.	Introduction	56
3.2.	Concepts et définitions	56
3.2.1.	Barrière	56
3.2.2.	Fonction de barrière	57
3.2.3.	Système de barrière	57
3.3.	Classification liée aux barrières de sécurité	58
3.3.1.	Classification des barrières selon la fonction	58
3.3.2.	Classification des systèmes de barrières	60
3.3.2.1.	Barrière Humaine de Sécurité (BHS)	61
3.3.2.2.	Barrière organisationnelle	62
3.3.2.3.	Barrière technique de sécurité (BTS)	62
3.4.	Les critères de performance des barrières de sécurité	64
3.4.1.	Efficacité	67
3.4.2.	Temps de réponse	67
3.4.3.	Niveau de confiance (NC)	67
3.5.	Les barrières de sécurité au niveau des bacs de stockage	68
3.6.	Cuvette de rétention	70
3.6.1.	Définition	70
3.6.2.	Type des cuvettes de rétention	70
3.6.2.1.	Les cuvettes qui contiennent un bac	71
3.6.2.1.1.	<i>Cuvette basse</i>	71
3.6.2.1.2.	<i>Cuvette haute</i>	72
3.6.2.2.	Cuvette éloigné.....	73
3.6.2.3.	Cuvette combiné	74
3.7.	Les types des bordures de la cuvette	75
3.8.	Capacité de la cuvette	75
3.9.	Conclusion	76
Chapitre 4.	Situation des barrières de sécurité dans l'entreprise algérienne.....	77
4.1.	Introduction	78
4.2.	Évaluation du système de sécurité (barrières techniques et humaine)	79
4.2.1.	Décomposition du système	79
4.2.1.1.	Barrière de détection (A1)	81
4.2.1.2.	Barrière de refroidissement (A2)	81
4.2.1.3.	Barrière de vidange (A3)	82
4.2.1.4.	Barrière d'extinction (A4)	82
4.2.1.5.	Le facteur humain (A5)	83
4.2.2.	Identification des fonctions des barrières	83
4.2.3.	Les causes des défaillances du système de sécurité	84
4.2.4.	Rôle de facteur humain dans le SSI utilisé en Algérie	87
4.3.	Evaluation les lois et les textes réglementaires algériens (barrière	

organisationnelle)	88
4.4. La réalité des raffineries algériennes face aux accidents industriels...	95
4.5. Conclusion	99
Chapitre 5. Le modèle d'amélioration proposé pour le système de sécurité d'un bac de stockage d'hydrocarbure.....	101
5.1. Introduction	102
5.2. Méthodes et matériel	102
5.2.1. Matériel	103
5.2.2. Méthodologie	104
5.2.2.1. L'effet de vidange	104
5.2.2.1.1. <i>L'effet de la vidange sur le système</i>	<i>104</i>
5.2.2.1.2. <i>L'effet de la vidange sur l'environ du bac</i>	<i>105</i>
5.2.2.1.3. <i>L'effet de la vidange sur le bac de stockage</i>	<i>105</i>
5.2.2.2. Choix et présentation de modèle proposé de vidange	106
5.2.2.2.1. <i>Choix d'orifice</i>	<i>106</i>
5.2.2.2.2. <i>Proposition de modèle de vidange</i>	<i>108</i>
5.2.2.3. Vérification de modèle proposé.....	108
5.3. Résultat et discussion	109
5.3.1. L'effet de vidange	109
5.3.1.1. L'effet sur le système	109
5.3.1.2. L'effet sur l'environ du bac	110
5.3.1.3. L'effet sur le bac	115
5.3.2. Choix et présentation de modèle proposé de vidange.....	118
5.3.2.1. <i>Choix d'orifice</i>	<i>118</i>
5.3.2.2. <i>Proposition d'un modèle de vidange</i>	<i>119</i>
5.3.3. Vérification de modèle proposé	120
5.4. Conclusion	124
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	125
BIBLIOGRAPHIE	129
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Familles des hydrocarbures	9
Figure 1.2 : Les limites d'inflammabilité	14
Figure 1.3 : Différents types des bacs selon ses positions	18
Figure 1.4 : Les sphères de stockage de GPL	19
Figure 1.5 : Les cigares	19
Figure 1.6 : Les réservoirs à évente	20
Figure 1.7 : Cuve ouverte	20
Figure 1.8 : Réservoir à toit fixe	21
Figure 1.9 : Réservoirs à toit flottant externe	22
Figure 1.10 : Réservoirs à toit flottant interne	22
Figure 2.1 : Matrice de risque	29
Figure 2.2 : Relation entre les notions de danger et de risque	29
Figure 2.3 : Diagramme de Farmer	30
Figure 2.4 : Processus de management de risque	33
Figure 2.5 : Représentation du concept de la simulation et la modélisation	34
Figure 2.6 : Les modèles d'évaluation d'incendie	35
Figure 2.7 : Schéma général de la méthode SADT	36
Figure 2.8 : Processus du modèle MADS	37
Figure 2.9 : Schématisation d'un arbre de défaillance	38
Figure 2.10 : Schématisation d'un arbre d'événement	39
Figure 2.11 : Schématisation de nœud de papillon	40
Figure 2.12: Schéma général de la méthode BORA	41
Figure 2.13: Les risques liés aux bacs de stockages	44
Figure 2.14 : Exemple de corrosion d'un bac de stockage (cas du dépôt de stockage de Sidi Rciné–Alger)	45
Figure 2.15 : Tassement dû au tremblement de terre de d'Izmit, Turquie 1999	45
Figure 2.16 : Tassement dû au tremblement de terre d'Emilia (Italie 2012)	45
Figure 2.17 : Vu d'une bouche de fissure causée par la corrosion biologique	46
Figure 2.18 : Déformation d'un bac à Rincon de los Sauces 2006 à cause du vent	46
Figure 2.19 : Contamination de rivière d'Ambarnaya par le rejet d'hydrocarbures (russe, 2020).	47
Figure 2.20 : Vue de l'accident de jet de feu de Ghislenghien 2004 (Belgique)	48
Figure 2.21 : Vu de boil over de Skikda (Algérie 2005)	49
Figure 2.22 : Vu du BLEVE de Feyzin (France 1966)	50
Figure 2.23 : Vu d'un UVCE (Buncefield, Royaume-Uni 2005)	51
Figure 3.1: Modèle de Swiss Cheese version 2000	56
Figure 3.2 : Les fonctions des barrières de sécurité	59
Figure 3.3: Les types des barrières de sécurité	61
Figure 3.4 : Exemple d'un SIS (détecteur)	63
Figure 3.5 : Les types des cuvettes	71
Figure 3.6 : Schématisation d'une cuvette basse	72
Figure 3.7: Schématisation cuvette haute modèle double confinement	72
Figure 3.8: Schématisation cuvette haute modèle confinement complet	73
Figure 3.9: Schématisation cuvette haute modèle confinement membranaire	73
Figure 3.10: Schématisation d'une cuvette éloigné	74
Figure 3.11: Schématisation d'un modèle combiné avec cuvette éloigné libre	74

Figure 3.12: Schématisation d'un modèle combiné avec cuvette éloigné alimenté par motopompe	75
Figure 3.13: Les types des bordures des cuvettes	75
Figure 4.1 : Le système de sécurité par SADT	79
Figure 4.2 : Décomposition du système de sécurité par SADT	83
Figure 4.3 : Diagramme de bloc barrière pour le scénario relatif au système de sécurité algérien d'un bac de stockage	82
Figure 4.4: Arbre de défaillance appliqué sur le système de sécurité du bac de stockage	86
Figure 4.5 : Nombre des accidents et incidents	97
Figure 4.6 : Nombre de différents accidents et incidents	97
Figure 4.7 : Nombre de victimes	97
Figure 5.1 : Système de sécurité de bac de stockage	103
Figure 5.2 : Méthodologie de travail	104
Figure 5.3 : Les étapes de l'étude de l'effet de vidange	104
Figure 5.4: Représentation schématique de la modélisation et de son environnement	105
Figure 5.5 : Les étapes de l'étude de Choix de modèle	106
Figure 5.6 : Principe de vidange d'un réservoir	107
Figure 5.7 : Les modèles de l'étude	108
Figure 5.8 : Méthodologie de la Vérification de modèle proposé	109
Figure 5.9 : Arbre d'événement d'un bac de stockage sans le vidange	110
Figure 5.10 : Arbre d'événement d'un bac de stockage avec la vidange	110
Figure 5.11 : Distances des zones de danger toxique en fonction du taux de vidange	113
Figure 5.12 : Distance des zones de danger d'effet thermique en fonction du taux de vidange	114
Figure 5.13 : Le maillage de bac utilisé	115
Figure 5.14 : La contrainte du le réservoir à l'état critique	115
Figure 5.15 : Déplacements du réservoir à l'état critique	116
Figure 5.16 : Déformation exercée sur le réservoir à l'état critique	116
Figure 5.17 : La contrainte du le réservoir à l'état d'ébullition	117
Figure 5.18 : Déplacements du réservoir à l'état d'ébullition	117
Figure 5.19 : Déformation exercée sur le réservoir à l'état d'ébullition	118
Figure 5.20 : Temps de vidange du bac en fonction du rayon d'orifice	119
Figure 5.21 : Démonstration du modèle proposé	120
Figure 5.22 : Démonstration de modèle de pipeline.	120
Figure 5.23 : Schématisation de modèle simple	121
Figure 5.24 : Courbes de suivi de la température du benzène dans le modèle simple	122
Figure 5.25 : Schématisation du modèle de vidange proposé	122
Figure 5.26 : Courbes de suivi de la température du benzène dans le modèle proposé	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Propriétés de quelques produits hydrocarbonés	15
Tableau 1.2 : Classification des réservoirs selon le critère de pression	17
Tableau 2.1: La méthode AMDE	41
Tableau 2.2 : Les causes et conséquences des risques liés au bac de stockage	52
Tableau 3.1: Différentes classifications du système de barrières	61
Tableau 3.2: Les paramètres de performance des barrières de sécurité	66
Tableau 3.3: Différentes barrières de sécurité des bacs de stockage	69
Tableau 4.1: Rôle de l'être humain dans le système de sécurité des bacs de stockage.	88
Tableau 4.2 : Les textes réglementaires liés aux hydrocarbures	89
Tableau 4.3 : Les textes réglementaires liés à l'environnement	90
Tableau 4.4 : Les textes réglementaires liés à la sécurité	91
Tableau 4.5 : Les accidents et les incidents déclarés de la raffinerie de Skikda pour la période de 2002-2016	96
Tableau 4.6 : Taux de fréquence et de gravité des accidents du travail	98
Tableau 5.1: Caractéristiques du bac	103
Tableau 5.2: Caractéristiques de benzène C ₆ H ₆	103
Tableau 5.3: Caractéristiques des parois	103
Tableau 5.4: Paramètres utilisés dans le cas critique	106
Tableau 5.5: Paramètres utilisés dans le cas d'ébullition	106
Tableau 5.6 : Zones de danger par l'effet toxique et thermique illustré par ALOHA	111
Tableau 5.7 : Les distances des zones de danger toxique en fonction du taux de vidange	113
Tableau 5.8 : Les distances des zones de danger d'effet thermique en fonction du taux de vidange	113
Tableau 5.9 : Les valeurs maximales et minimales du cas critique	116
Tableau 5.10 : Les valeurs maximales et minimales du cas d'ébullition	118
Tableau 5.11 : Temps et débit de vidange en fonction de rayon d'orifice	119
Tableau 5.12 : Caractéristiques du modèle proposé	120
Tableau 5.13 : Paramètres utilisés dans la simulation de fluide	120
Tableau 5.14 : Les valeurs de débit correspond au temps à l'entrée de modèle proposé	121
Tableau 5.15 : Comparaison des modèles de rétention	124

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES

AdD	: Arbre défaillance
AIT	: Température d'auto-inflammation
AMDE	: Analyse des modes de défaillance et de leurs effets
AMDEC	: Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticités
APR	: Analyse préliminaire de risque
BLEVE	: Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
BORA	: Barrier and Operational Risk Analysis
CCPS	: Center for Chemical Process Safety
CFD	: Computational Fluid Dynamics
EPI	: Equipements de protection individuelle
F	: Fréquence
FAST	: Function analysis system technique
FDS	: Fire Dynamics Simulator
G	: Gravité
GNL	: Gaz naturel liquifié
GPL	: Gaz de pétrole liquéfié
HRA	: Analyse de fiabilité humaine
ISO	: Organisation internationale de normalisation
LIE / LSE	: Limite supérieure d'inflammabilité ou d'explosion
LII / LSI	: La limite inférieure d'inflammabilité ou d'explosion
LOPA	: Layer of Protection Analysis
MADS	: Méthode d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes
MoDyF	: Modèle de Dysfonctionnement Formel
P _c	: Pression critique
P _e	: Point d'éclaire
PV	: Pression de vapeur
R	: Risque
SADT	: Structured Analysis and Design Technical
SIF	: Fonction de sécurité instrumentée
SIL	: Safety Integrity Level
SIS	: Système Instrumenté de Sécurité
SLIM	: Success Likelihood Index Method
SONATRACH	: Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation, et la commercialisation des hydrocarbures
TESEO	: Tecnica Empirica Stima Errori
THERP	: Technique for Human Error Rate Prediction
Δl (m)	: Allongement
A (mm ²)	: Section
D (m)	: Déplacement
F (N)	: Force
g(m/s ²)	: Gravite
h(m)	: Hauteur finale
h ₀ (m)	: Hauteur de produit
L (m)	: Longueur initiale
Q (m ³ /s)	: Débit

r (m)	: Rayon d'orifice
R (m)	: Rayon du bac
S (m)	: Section
t (s)	: Temps de vidange d'un réservoir
T_c	: Température critique
TE	: Température d'ébullition
v (m/s)	: Vitesse
V (m ³)	: Volume de produit
σ (N/m ²)	: Contrainte
ε	: Déformation

Introduction générale

Introduction générale

Dans un univers régi par un développement rapide, où toutes les entreprises se précipitent pour avoir et monopoliser la technologie qui évolue avec le temps, ce qui présente de nombreux avantages surtout le retour économique en peu de temps, c'est ce qui rend la compétition intense. Habituellement, après chaque développement technologique, on prend en considération les risques qui en découlent, pour se prémunir contre ces risques. Désormais, il existe un système dit de sécurité industrielle, où chaque système a son propre système de sécurité. Par conséquent, les parcs de stockage d'hydrocarbures disposent également d'un système de sécurité qui vise à fournir une protection des conséquences de ces produits pour préserver l'entreprise d'une part (dégâts matériels et corporels) et protéger l'environnement d'autre part. Ces industries sont les sièges des risques majeurs tels que des libérations de produits stockés, des incendies et des explosions pouvant être source ou même se développer en d'autres phénomènes dangereux tels que BOILOVER et BLEVE, (Hammouya & Kabouche, 2017, 2019; Sellami, 2019). Ces phénomènes ont été pris en charge dans le cadre de plusieurs travaux de recherches pour les comprendre, les approfondir, identifier les facteurs qui les affectent, voire les éviter (Laboureur et al., 2015) (Leite & Centeno, 2018) (Ahmadi et al., 2019; Centeno et al., 2020; Rengel et al., 2018; Sellami et al., 2018; M. Zhang et al., 2014).

Comme mentionné ci-dessus, le système industriel est en plein développement, de sorte que le système de sécurité doit également suivre le rythme de ce développement. C'est ce qui s'est vraiment passé, où le système de sécurité des hydrocarbures a suscité un grand intérêt au niveau de toutes ses parties, qui sont divisées généralement en deux grandes sections : de prévention et de protection.

Pour remédier à ces phénomènes dangereux, plusieurs techniques ont été utilisées pour améliorer la fiabilité de système de détection surtout pour la maîtrise de l'incendie comme les détecteurs de flamme, fuite de gaz et de liquide, de fumée, etc. (Bogue, 2013). Parmi ces techniques, on trouve des contributions pour l'amélioration des systèmes tels que la proposition de la détection d'incendie avec des caméras basées sur des méthodes de vision par ordinateur (Wu et al., 2019). Les technologies de l'Internet des objets (IoT) ont également été utilisées pour

concevoir et construire un système de télémétrie pour surveiller la concentration de GPL dans l'air ambiant en temps réel (Flores-Cortez et al., 2021).

La barrière de refroidissement a également été améliorée (Guillemet, 1992) de plusieurs manières, la méthode de la densité linéaire (Alimohammadi et al., 2014); en plus d'une technique de protection combinée a été développée qui porte la fonction de refroidissement et d'extinction à la fois, à l'aide de la combinaison d'un agent gazeux et de l'eau pulvérisée (L. Zhang et al., 2020).

Ainsi le modèle d'extinction par le brouillard explosif de l'eau est considéré comme une méthode efficace pour éteindre les incendies (Li & Wang, 2011). Ici, il faut aussi signaler que la mousse est l'agent extincteur le plus utilisé dans le cas des incendies des hydrocarbures, où de nombreux chercheurs ont développé cette mousse extinctrice aux hydrocarbures (XING & Jin-Xin, 2009)(Xing-yi, 2012). Cependant, il faut remarquer que cette technique peut causer des effets néfastes sur l'environnement (Arnault, 2018). De ce fait, la composition de la mousse utilisée dans l'extinction a été développée et les matériaux toxiques ont été réduits afin de minimiser les dommages à l'environnement (Arnault, 2018) (Lee et al., 2015).

Même le facteur humain n'a pas été exempté de cette préoccupation, le processus d'extinction est numérisé par des simulations pour assurer une formation continue ayant pour but d'augmenter la fiabilité humaine et de système (Pitana et al., 2020). On remarque que cette préoccupation n'a pas affecté toutes les parties du système de sécurité des bacs de stockages de la même manière.

PROBLÉMATIQUE

L'Algérie occupe une place importante dans l'ensemble des pays producteurs des hydrocarbures. Toutefois ces dernières années, les établissements industriels ont connu une augmentation rapide du nombre d'accidents industriels majeurs. Afin d'éviter de tels phénomènes dangereux ou encore le rejet des matières dangereuses, les industriels sont amenés à mettre en place des mesures de maîtrise des risques dont le rôle est de prévenir l'apparition de tels phénomènes ou d'en limiter les conséquences. De ce fait, il s'avère indispensable de développer des approches pour répondre à cette question.

Ainsi et malgré cet intérêt accru, on constate que les accidents se produisent encore en succession et de gravités variables avec des dégâts corporels, matériels et environnementaux. À titre d'exemples, on peut citer l'accident du 29 mai 2020 en Ibérie, de fuite de 21 1000 tonnes de diesel appartenant à la centrale thermique Norilsk Nickel près de la ville de Norilsk dans la région d'Ambarnaya de l'Arctique (Sibérie). Cette fuite a conduit à une énorme pollution d'environ 350 kilomètres carrés au niveau de la rivière Ambarnaya qui alimente le lac Piassino, devenu tout rouge. Le coût du nettoyage a coûté plus de 146 millions de dollars, tous ces frais étant à la charge de l'entreprise responsable du réservoir effondré à la suite du vieillissement, qui est la cause directe de cet incident en plus de l'intervention retardée de ce qui est compliqué la situation (FRANCE 24, 2020).

Notre pays n'est pas épargné de ces phénomènes, ici, on peut citer l'accident du 05 Octobre 2005, le BOILOVER des bacs S105 et S106 au terminal (RA1K) de Skikda, d'une explosion ou on a observé d'une boule de 1 km de diamètre, avec comme conséquences 21 décès et 72 blessés et environ 6 millions de dollars de pertes, et bien sûr la pollution (Hamzi, 2008).

Dans les deux cas cités comme exemples, le désastre aurait pu être évité en vidant les réservoirs en danger vers un endroit plus sûr. Dans le premier cas, la fuite aurait pu être contrôlée et qui ne présente aucun danger secondaire. Cependant pour le deuxième phénomène qui est un Boilover aurait pu être prédit (Hristov et al., 2004) et on aura dans ce cas le temps de prendre la décision, voire le mettre en œuvre. C'est pourquoi, la question au quelle répond ce travail est comment aborder l'évaluation de ces barrières de sécurité en vérifiant leurs performances et comment traduire cette sécurité en termes opératoires d'aide à la décision. Ainsi, en répondant aux questions suivantes :

- Quel est le rôle de vidange et quel est son effet ? Cette barrière peut-elle être développée?
- Quelle est la situation des entreprises algérienne face au système de sécurité d'incendie des bacs de stockage ?
- Parmi les barrières de ce système, on trouve le facteur humain, c'est quoi son rôle dans ce système?

OBJECTIF

L'objectif de ce travail est de répondre à ces questions posées par la contribution de l'amélioration de système de sécurité des bacs de stockage, voire améliorer ses barrières de sécurité. Dans ce contexte, ce travail est basé sur la proposition d'un modèle de vidange des bacs de stockage en cas de fuite, échauffement ou bien feu de nappe, qui assure la préservation de produit, de bac de stockage, de l'environnement et bien sûr de l'être humain. Ce modèle de vidange est libre de toute énergie et permet de refroidir le produit par convection libre. Cet objectif peut être réparti en sous-objectifs, tel que :

1. Se familiariser avec les bacs de stockage des hydrocarbures, ses risques, ses causes et conséquences, et ses barrières de sécurité ;
2. Identifier les composantes (barrières) du système de sécurité d'un bac de stockage ;
3. Identifier le rôle de facteur humain dans le système de sécurité, les causes et les conséquences de ses erreurs ;
4. Déterminer l'effet de vidange sur plusieurs côtés ;
5. Améliorer le système de sécurité par la proposition d'un modèle d'une barrière technique.

PLAN DE LA THÈSE

Cette thèse est scindée en une introduction générale qui schématise la situation actuelle et la problématique du sujet, cinq chapitres et une conclusion.

Chapitre 1 : ce chapitre donne une vision générale sur les hydrocarbures, ses caractéristiques, ses modes de stockage, etc. C'est un chapitre inaugural qui ne peut être ignoré, car il prend des concepts et des termes lesquelles se basé les autres chapitres.

Chapitre 2 : consacré aux concepts et notions spécifiques à l'étude de danger, aux les différents modes d'analyse des risques, pour arriver au cœur de l'identification des risques liés au stockage des hydrocarbures, ces causes et conséquences.

Chapitre 3 : consacré aux barrières de sécurité et aux concepts de base qui y sont liés, à l'identification des différentes barrières techniques de sécurité utilisés dans les différents bacs de stockage tout en mentionnant la barrière la plus importante dans cette étude en abordant sa fonction, son importance et ses types, etc.

Chapitre 4 : Il présente une critique complète et détaillée du système de sécurité industrielle des réservoirs de stockage en Algérie, tout en commençant par les lois régissant et réglementant toutes les activités d'hydrocarbures, l'environnement et la sécurité. Ce chapitre montre également l'influence de ces lois sur le nombre et la gravité des accidents. Pour ensuite, compléter en introduisant le rôle du facteur humain.

Chapitre 5 : On présente notre contribution à l'amélioration suggérée. Cette étude qui est basée sur l'amélioration d'une des barrières techniques de protection du bac de stockage qui est la cuvette de rétention. Avec cette amélioration on peut protéger les êtres humains, les bacs de stockage, le produit ainsi que l'environnement tout en effectuant une vidange du bac en toute sécurité dans une autre cuvette souterraine destiné uniquement à ces fins.

Enfin, cette thèse est clôturée par une conclusion générale décrivant les principaux résultats de ce travail de recherche et les perspectives envisagées.

Chapitre 1

Généralité sur les bacs de stockage

Chapitre 1. Généralité sur les bacs de stockage

1.1. Introduction

La consommation d'énergie est en croissance dynamique depuis la révolution industrielle. Cette énergie peut être devisée selon son origine telle que l'énergie nucléaire, le gaz, le pétrole ... etc. Les deux dernières sources d'énergie sont de la même famille qui est l'hydrocarbure, où la consommation de ces produits affecte 56,79% de la consommation totale d'énergie en 2015(Schiffer, 2016). Par conséquent, la charge élevée d'hydrocarbures est la principale caractéristique du secteur pétrolier, qui nécessite la mise à disposition d'énormes capacités de stockage sous forme de liquide ou de gaz. Ainsi, se prémunir contre tout déficit potentiel. Donc, le stockage des hydrocarbures est d'une grande importance pour le fonctionnement de toute activité.

Dans ce chapitre, nous présenterons les concepts de base du secteur des hydrocarbures. Il vise à donner une vision générale sur les hydrocarbures et la manière dont ces produits sont stockés.

1.2. Généralité sur l'hydrocarbure

1.2.1. Définition des hydrocarbures

Selon la **Loi algérienne n° 19-13 du 11 décembre 2019**, considère « les hydrocarbures liquides, gazeux, y compris ceux issus des formations géologiques argileuses et/ou schisteuses et les hydrocarbures solides notamment les sables bitumineux et les schistes bitumineux, existant à l'état naturel, autrement dénommés pétrole brut ou gaz naturel, selon le cas, incluant les liquides de gaz naturel, les gaz de pétrole liquéfiés, les condensats, les hydrates de méthane, ainsi que tous les produits et substances connexes extraits et associés aux hydrocarbures ».

Alors, les hydrocarbures sont des produits composés par les molécules de carbone et d'hydrogène. Généralement, les hydrocarbures sont plus légers que l'eau où elles flottent sur lui. En plus, ces substances sont caractérisées par la volatilité et sont pour la plupart inflammables.

Ces produits ont une grande importance sachant qu'on les utilise comme énergie avec une représentation respectivement de 32.94% pour le pétrole et de 23.85% pour le gaz par rapport aux autres énergies (Schiffer, 2016). Elles sont utilisées comme des huiles de lubrification et aussi comme une matière première en synthèse pétrochimique (DALEMONT & CARRIÉ, 1992).

1.2.2. L'Origine des hydrocarbures

Tous les chercheurs s'accordent à l'heure actuelle pour admettre la théorie de l'origine organique des hydrocarbures. Le pétrole serait le résultat de la décomposition des restes des animaux marins par l'effet de bactéries anaérobies, la température et la pression. Cependant d'autres origines sont évoquées, telles que :

- les rejets industriels et urbains ;
- les végétaux aquatiques ;
- les végétaux supérieurs terrestres (Rouidi, 2014).

1.2.3. Composition des hydrocarbures

Compte tenu de l'arrangement de la tétravalence de l'atome de carbone et de la monovalence de l'atome d'hydrogène, les hydrocarbures se divisent en trois familles, figure 1.1 :

- Les hydrocarbures aliphatiques ;
- Les hydrocarbures naphténiques ;
- Les hydrocarbures aromatiques.

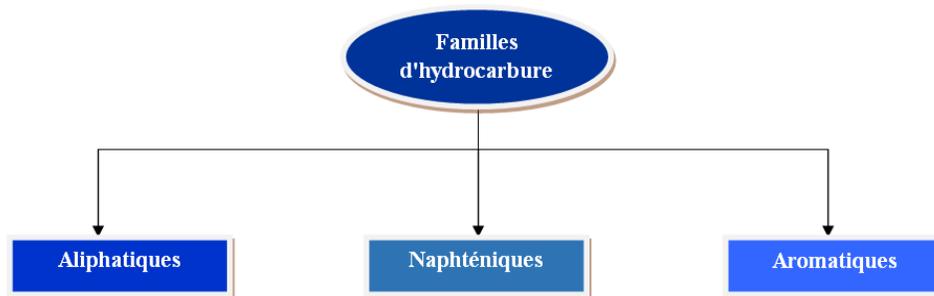


Figure 1.1 : Familles des hydrocarbures

1.2.3.1. Les hydrocarbures aliphatiques

Le terme aliphatique est dérivé du mot grec aleiphar-atos, qui signifie huile ou graisse (Larousse collectif, 2006). Ce sont des composés dépourvus d'aromatiques à chaînes ouvertes ou

acycliques selon la nature des liaisons entre les atomes de carbone. Cette famille peut être saturée où on peut les appeler les paraffines ou les alcanes avec la formule C_nH_{2n+2} ou bien non saturé nommées les alcènes, sa formule chimique est C_nH_{2n} . L'existence de ces hydrocarbures est variée entre 10 et 40% dans le pétrole (Soltani, 2004). Parmi les produits de cette famille, il y a le méthane CH_4 .

1.2.3.2. Les hydrocarbures naphténiques

Les naphténiques sont des hydrocarbures cycliques (chaîne fermée) et caractérisée par un anneau d'atomes de carbone saturé dont sa formule générale est C_nH_{2n} . Sa présence dans le pétrole brut est de 30 à 50 % des hydrocarbures totaux (Soltani, 2004). Cette famille comprend beaucoup des substances comme le cyclohexane (C_6H_{12}) et le cyclopentane (C_5H_{10}).

1.2.3.3. Les hydrocarbures aromatiques

En général, les aromatiques sont des hydrocarbures qui ont des propriétés associées au noyau ou au cycle benzénique dont la formule générale est C_nH_{2n-6} ; sa présence dans le pétrole brut varie de 10 à 30% du total des hydrocarbures (Soltani, 2004). Ils sont généralement utilisés dans les parfums, les colorants et les industries pharmaceutiques (Rouidi, 2014). Parmi ces produits, il existe le benzène et le Toluène.

1.2.4. Description de certains hydrocarbures courants

1.2.4.1. Pétrole brute

Le Pétrole brute a été découvert par David Beaty en 1875. Il se compose principalement d'hydrocarbures et de composés contenant du soufre, de l'azote, de l'oxygène et des oligo-éléments comme composants secondaires. Mais, pratiquement il est impossible de déterminer la composition détaillée du pétrole brut et identifier tous ses composants chimiques (Gravier, 1900), donc les pourcentages des différents composants du pétrole brut qui contrôlent ses propriétés physiques et chimiques, son odeur et sa couleur.

1.2.4.2. Méthane

Le méthane, également appelé gaz de marais, a été découvert par Alessandro Volta (1745-1827) entre 1776 et 1778 en Italie. Il est considéré comme l'hydrocarbure le plus simple. Il se présente en un gaz inflammable composé de carbone et d'hydrogène avec la formule chimique (CH_4) (Billard, 2015; Reeburgh, 2007). Le méthane est un asphyxiant et un facteur limitant d'oxygène. Il est ni irritant, ni toxique, mais il peut provoquer des gelures (pcheremisinoff, 2000). Il est plus léger que l'air, incolore, inodore, insipide et inflammable. Il se produit dans le gaz naturel et comme sous-produit du raffinage du pétrole. Dans le cas de la combustion atmosphérique, la production de fumée ne se produit généralement pas. Il forme un mélange explosif avec l'air à une échelle moyenne. Ses principales utilisations sont comme carburant et comme matière première pour les produits pétrochimiques.

1.2.4.3. Propane

Le propane a été découvert par le chimiste français Marceline Berthelot (1827-1907) en 1857 (Rasmussen, 2018). C'est un gaz incolore et inodore, sa formule chimique est C_3H_8 . Le propane est dérivé d'hydrocarbures, comme le gaz et le pétrole, pendant le processus de raffinage.

Une forte concentration de la vapeur du propane provoque l'asphyxie (pcheremisinoff, 2000). Le propane ne réagit pas vigoureusement à température ambiante. Cependant, il réagirait avec le chlore dans les mêmes conditions s'il était exposé à la lumière. À des températures plus élevées, une grande quantité de propane brûle dans l'air, produisant du dioxyde de carbone et de l'eau comme produits finaux.

1.2.4.4. Butane

Le chimiste Edward Frankland (1825-1899) a été découvert le butane en 1849 (Seyferth, 2001). C'est un hydrocarbure saturé de la famille paraffine de formule chimique C_4H_{10} . Selon sa structure, le butane a deux formes : le n-butane et l'i-butane. Cette diversification se traduit par des petites différences de propriétés pratiquement. Il est inoffensif pour la peau, car il est très volatil et s'évapore rapidement (pcheremisinoff, 2000). Il est utilisé comme combustible conditionné en bouteille à l'usage domestique.

1.2.4.5. Benzène

Le Benzène est un hydrocarbure de la famille aromatique, il a été découvert par Michael Faraday (1791-1867) en 1825, le chimiste allemand A.W. von Hofmann (1818-1892) a isolé le benzène du goudron de la houille en 1845 (Parke, 1989). Sa formule chimique est C_6H_6 . Le benzène est un liquide avec une odeur distincte et incolore. Il est principalement utilisé dans la production de polystyrène. Suite à une exposition au benzène, on peut ressentir les symptômes suivants : étourdissements, excitation, pâleur, suivis de rougeurs, faiblesse, maux de tête, essoufflement, constriction thoracique, coma et mort possible (p cheremisinoff, 2000), aussi il est connu comme cancérogène (Maxwell & Lawal, 2016).

1.2.4.6. Kérosène

Le Kérosène ou carburacteur est un hydrocarbure de la famille paraffine avec la formule chimique de $C_{10}H_{22}$ à $C_{14}H_{30}$. Il se compose de 60% de paraffines, 32% de naphthènes et 7,7% d'aromatiques (Ghassemi et al., 2006). Il est généralement utilisé comme carburant pour les réacteurs des avions ou pour l'éclairage. L'exposition à la vapeur de kérosène provoque une légère irritation des yeux et du nez. Si elle se coince dans les poumons, elle provoque une toux et détresse et évolue rapidement vers un œdème pulmonaire. Ainsi le liquide de kérosène irrite l'estomac (p cheremisinoff, 2000).

1.2.4.7. L'essence

L'essence ou gazoline en anglais, ce mot a été utilisé pour la première fois dans le dictionnaire anglais « Oxford » en 1863 (*De l'essence - Gasoline*, 2020). C'est un produit qui a été séparé du pétrole brut après l'extraction du kérosène qui est le produit principal, et cela par distillation dans la gamme de 38 à 204 degrés Celsius. C'est pour ça il contient beaucoup de produits hydrocarbures qu'ils ont des différentes familles (Nolan, 1996). Son utilisation était limitée comme carburant pour les véhicules et les moteurs à combustion interne.

1.2.5. Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures

Pour déterminer le niveau de risque des hydrocarbures, il faut connaître de nombreuses propriétés différentes qui peuvent être utilisées dans ce but, puisqu'il n'y a pas de caractéristique

unique sur laquelle on peut compter pour déterminer correctement le niveau de risque d'une substance particulière (Gravier, 1900; Nolan, 1996).

1.2.5.1. La densité

La densité ou la gravité spécifique d'un fluide est sa masse volumique par rapport de à celle de l'eau. Chacune d'elles étant mesurée à une température donnée, qui est généralement 15,6°C (équation 1.1).

$$\text{Densité} = \frac{\text{masse d'un volume de produit à } 15,6 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{masse du même volume d'eau à } 15,6 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad (1.1)$$

1.2.5.2. Les limites d'inflammabilité (explosivité)

Les limites d'inflammabilité ou d'explosivité (LII / LSI ou LIE / LSE) sont des limites qui constituent une zone ou un domaine d'inflammabilité d'un mélange de combustible à l'état de vapeur ou de gaz et de carburant. Si la concentration de combustible est moins que la limite inférieure d'inflammabilité (explosion), alors le mélange soit pauvre, par contre le mélange riche, la concentration de combustible dépasse la limite supérieure d'inflammabilité (explosion), dans les deux états ci-dessus, les mélanges ne forment pas un mélange inflammable ou explosif.

Généralement, ces valeurs sont exprimées en % du volume de combustible dans le volume total de mélange (figure 1.2), à savoir :

LII/ LIE : c'est la limite inférieure d'inflammabilité ou d'explosion, elle est la concentration minimale de volume de gaz ou de vapeur inflammables sachant que le mélange au-dessus d'elle peut s'enflammer ;

LSI/LES : la limite supérieure d'inflammabilité ou d'explosion est la concentration maximale de volume de gaz ou de vapeur inflammable où le mélange au-dessous d'elle peut s'enflammer.

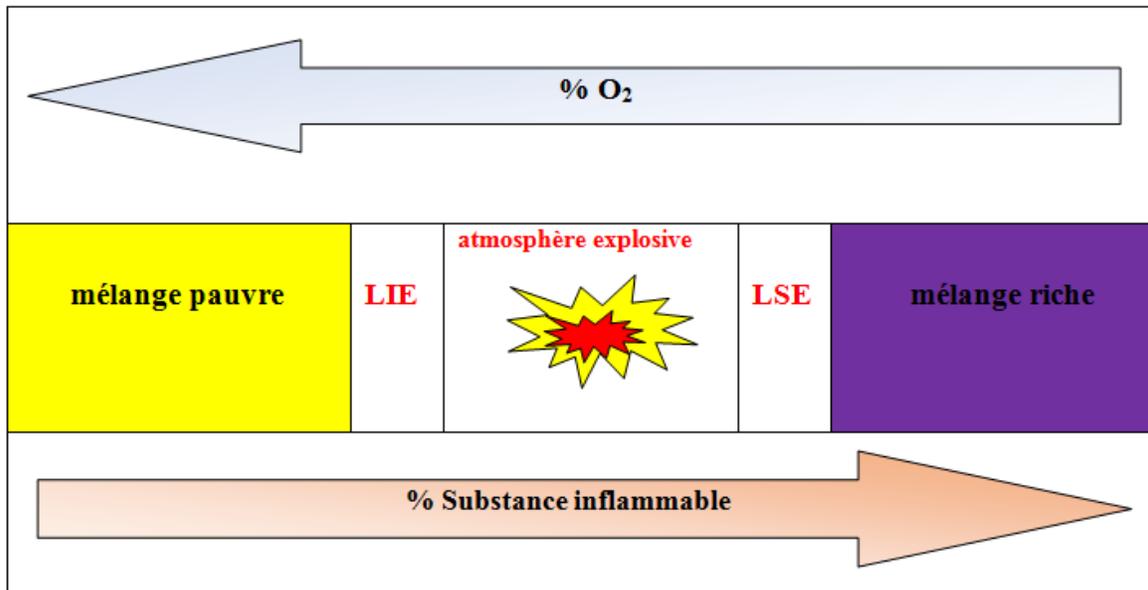


Figure 1.2 : Les limites d'inflammabilité

1.2.5.3. Point d'éclaire

Le point d'éclaire (Pe) est la température la plus basse d'un liquide/solide inflammable à laquelle il dégage suffisamment de vapeur pour former avec l'air un mélange inflammable qui s'enflamme au premier contacte d'une flamme mère.

1.2.5.4. Température d'auto-inflammation (AIT)

La température d'auto-inflammation est la température à laquelle un produit chauffé émet des vapeurs et s'enflamme spontanément avec l'air si le mélange compris entre les limites d'explosivité (LIE et LES).

1.2.5.5. Point critique

Le point critique d'une substance est lorsqu'une matière arrive à un état caractérisé par certaines températures et pression nommé température critique (Tc) et pression critique (Pc). Dans de tel cas, le produit dépasse ce point et perde sa stabilité. Ici, il ne se produit aucune transformation telle que l'évaporation, la liquéfaction et peut entraîner des accidents dangereux.

1.2.5.6. Température d'ébullition

Chaque substance a un point d'ébullition caractérisé par la température d'ébullition(TE). Ce point est considéré comme un point de transformation de produit (évaporation). Il faut signaler que si la substance continue à bouillir sans se refroidir, cela crée de grands risques.

1.2.5.7. Pression de vapeur

La Pression de vapeur (PV) est la propriété d'une substance de s'évaporer à l'état liquide ou solide selon laquelle les liquides sont généralement classés. La pression de vapeur est généralement liée au point d'ébullition du matériau.

1.2.5.8. Les propriétés de quelques produits hydrocarbonés

Les caractéristiques des produits diffèrent d'un produit à l'autre. C'est ce qui les fait distingués les uns des autres. Le tableau suivant (Tableau 1.1) répertorie les propriétés de certains des produits hydrocarbonés les plus couramment utilisés (Ghassemi et al., 2006; Gravier, 1900; Nolan, 1996; p cheremisinoff, 2000; Qi & Lee, 2016).

Tableau 1.1 : Propriétés de quelques produits hydrocarbonés

Produit	Densité	LIE/LSE %	Pe °C	TAI °C	Tc °C	Pc (bar)	TE °C	PV (bar)
méthane	0.55	5 -15	-188	537	190.7	0,04604	- 161.52	2,0265 (-152,3 °C); 40,53 (-86,3 °C);
propane	0.590à50°C	2 .1-9.5	-104	450	369.82	0,04249	-42.07	8,327 (20 °C) 17,081 (50 °C)
butane	0.60 à 0°C	1.5-8.5	-60	287	151,85	38,0	-0,5	2,081 (20 °C) 4,9 (50 °C)
Benzène	0.879 à 20°C	1.2- 7.8	-11	538 à 580 selon les sources	562.16	0,04898	80.09	0,126 (25 °C) 0,365 (50 °C)
kérosène	0.80 à 15 °C	0,6-6,5	49 à 55	220	388	18,1	180- 270	0,003 (20 °C)
L'essence	0.7321 à 20°C	0.6-8	-40	300 °C	25	217,85	25-215	0,35- 0,9 (37,8 °C)

1.3. Le stockage des hydrocarbures

La stratégie de stockage d'hydrocarbures consiste à les immobiliser, pour utiliser ces produits sous la forme initiale ou finale, dans des capacités de stockage appelées réservoirs ou des bacs spécialisés au stockage de chaque produit.

1.3.1. L'importance de stockage

Le stockage des hydrocarbures ne se limite pas à leurs zones de production ni pour compenser les fluctuations de l'offre et de la consommation dues aux déséquilibres lors des étapes de production et de transport, qui sont affectées particulièrement par les conditions météorologiques. Pour cette raison, le stockage est une stratégie de grande importance dans de nombreux domaines, qu'il s'agisse du raffinage, de la fabrication ou de la consommation. Cette importance est représentée, par exemple dans :

- Mettre le produit au repos suivi d'une opération de décantation avant l'exploitation ;
- La collecte de différents champs pétroliers afin d'acheminer de grandes quantités de produits ;
- La continuité de la production et de l'exploitation tout en assurant un stockage permanent ;
- Le contrôle de la qualité du produit expédié ;
- Le dégazage naturel pour l'élimination des gaz indésirables ;
- Assurer la continuité de fonctionnement des usines utilisant les produits hydrocarbonés comme matière première de sorte qu'une quantité appropriée doit être stockée en tant que processus stratégique ;
- Assurer le fonctionnement des autres secteurs de la production d'énergie électrique, telle que la turbine à gaz qui utilisent totalement les hydrocarbures ou turbine à vapeur qui l'utilisent partiellement. Ils doivent être disponibles en permanence et c'est ce qui nécessite de les stocker dans des quantités garantissant la continuité de la production même en cas d'urgence ;
- Pays consommateurs et non producteurs des hydrocarbures considèrent le stockage comme une procédure stratégique pour assurer l'existence de ces

produits dans les cas d'urgence. Ils doivent assurer un stock d'au moins de trois mois de consommation.

1.3.2. Les bacs de stockage

Le réservoir est une capacité fixe conçue pour stocker ou traiter des produits pétroliers. Ces réservoirs sont construits de différents types, tailles et matériaux tels que le carbone, les alliages d'acier ou les métaux. Ils peuvent également être construits en béton, et ils diffèrent également dans les conditions de stockage, en fonction du type de réservoir et de la fonction souhaitée.

1.3.3. Classification des bacs de stockage

Les bacs de stockage sont classés selon plusieurs critères, parmi ces critères il existe :

- La pression de vapeur ;
- La position par rapport au sol ;
- La forme du bac ;
- La nature du toit du réservoir.

1.3.3.1. Classification des réservoirs selon le critère de pression

Ce critère de classification est basé sur la pression de vapeur où chaque produit des hydrocarbures a des conditions différentes de stockage. Sous ce critère, il y a quatre catégories à l'aide d'Arrêté du **9 Nov 72** relatif à l'aménagement et l'exploitation de dépôts d'hydrocarbures liquéfiés, de l'**article 101** de la législation française (Arrêté du 09 /11/72, 1972), (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Classification des réservoirs selon le critère de pression

Catégorie	Sous catégorie	Propriété		Bac de stockage	Produit
A	A1	PV(15°C)>1 bar	T<0	cryogénique	GPL
	A2	PV(15°C)>1 bar	T>0	Sphère, cigare	Propane butane
B		P.E<55°C		Bac toit flottant	Essences, naphta
C	C1	100°C<PE>55°C	T>P.E	Bac toit fixe	gasoil
	C2		T<P.E		
D	D1	P.E> 100°C	T>P.E	bitumes	Réservoir à événements
	D2		T<P.E		

1.3.3.2. Classification des réservoirs selon la position par rapport au sol

Dans ce cas il existe 3 modes de positionnement, à savoir :

- **Aérien** : Dans ce cas le bac doit être totalement sur le sol et les conditions géologiques spéciales ne sont pas nécessaires, (figure 1.3.A) ;
- **Semi-enterré** : Ce type des bacs sont demi-intégré dans le sol, (figure 1.3.B) ;
- **Enterré** : Le bac de ce type nommé aussi souterrain, ils soient entièrement sous le sol. Ces bacs sont utilisés dans le cas d'absence d'espaces ou à proximité de complexes, (figure 1.3. C).

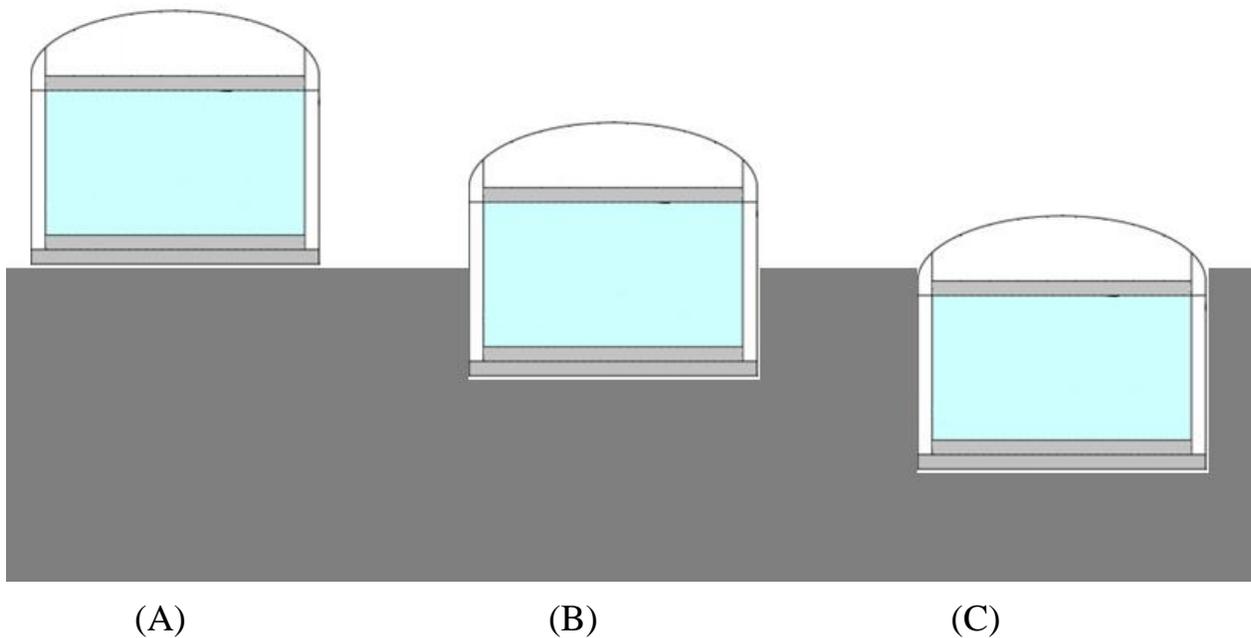


Figure 1.3 : Différents types des bacs selon ses positions

1.3.3.3. Classification des réservoirs selon les formes de stockage

Cette classification est basée sur la forme du bac, où il existe plusieurs formes de stockage selon le type de produit stocké et le champ producteur tel que :

- **La forme sphérique (les sphères)**

La sphère est considérée un bac de stockage aérien d'une forme sphérique, cette forme minimise les chocs de produit stocké par les coins et les bords des autres formes de stockage. En général, ils sont destinés pour stocker les GPL comme le butane à une température basse pour réduire l'évaporation de produit qui provoque des risques de grande gravité, (figure 1.4).



Figure 1.4 : Les sphères de stockage de GPL

- **La forme cylindrique horizontale** : il existe deux types des réservoirs dans cette catégorie à savoir :
 - **Les cigares** : Le cigare est un réservoir, sous pression de forme cylindrique horizontale, conçu pour stocker du propane liquide sous une pression supérieure à la pression ambiante, (figure 1.5).



Figure 1.5 : Les cigares

- **Les réservoirs à éventa** : Généralement, les réservoirs à éventa est employé pour stocker et transporter le bitume qui est un produit hydrocarbure visqueux, ce type de réservoir est cylindrique horizontale avec toit chauffé et contient des évents, (figure 1.6).



Figure 1.6 : Les réservoirs à évente

- **La forme cylindrique verticale**

Les réservoirs utilisés pour le stockage du pétrole brut et des produits pétroliers (autres que les GPL) sont des réservoirs cylindriques verticaux aériens en acier. Une des classifications de ces réservoirs consiste à les différencier selon le type de couverture (Toit). On distingue :

- **Les cuves ouvertes :** Les cuves ouvertes qui ne comportent pas de toit. Ces réservoirs sont principalement destinés au stockage d'eau d'incendie et des eaux de ballast. Ils ne conviennent pas pour le stockage des produits pétroliers, (figure 1.7).



Figure 1.7 : Cuve ouverte

(<https://www.agriexpo.online/fr/prod/Prive-Sa/Product-175639-71273.html>, n.d.)

- **Réservoir à toit fixe** : Ce type de réservoirs sont pourvus d'un toit et permettent donc une meilleure conservation et contrôle des produits inflammables, volatils ou polluants, (figure 1.8).

Le stockage des produits peu volatils et à faible tension de vapeur (inférieure à 0,1 bar) est réalisé dans des réservoirs où la partie supérieure est recouverte d'un toit fixe. Ce dispositif permet d'empêcher leur contamination par des agents extérieurs (pluie, poussières...), et assurer une rigidité suffisante au sommet de la robe.



Figure 1.8 : Réservoir à toit fixe

- **Réservoir à toit flottant** : Le toit flottant est un disque mobile qui flotte sur le liquide en suivant les mouvements de descente et de montée du produit. Pour permettre ces déplacements, un espace annulaire libre existe entre le toit et la robe de la cuve. Il est obturé par un système d'étanchéité déformable qui permet au toit de coulisser sans entraves à l'intérieur de la robe. Il existe deux types de réservoirs à toit flottant qui sont les réservoirs à toit flottant externe, dont le toit est installé à l'air libre dans des cuves ouvertes et les réservoirs à toit flottant interne, dont le toit est placé à l'intérieur de réservoir à toit fixe.
 - **Réservoirs à toit flottant externe** : Le réservoir proprement dit n'est autre qu'une cuve ouverte. La face inférieure du toit est complètement mouillée par le liquide sur lequel le toit flotte. Pratiquement aucun espace vapeur n'existe, ce qui permet de réduire considérablement les pertes par évaporation et les risques d'incendie, (figure 1.9).



Figure 1.9 : Réservoirs à toit flottant externe (*Les Industries, 2020*)

- **Réservoirs à toit flottant interne :** Ce sont des réservoirs à toit fixe dans lesquels est installé un toit flottant simplifié également appelé écran flottant. Le toit fixe peut être soit de type supporté, avec poteaux verticaux à l'intérieur du réservoir, soit du type autoportant sans poteaux. Lorsque la structure comporte des poteaux, ils traversent le toit flottant par des puits équipés de joints d'étanchéité des puits. Ces réservoirs sont particulièrement bien adaptés pour le stockage des produits volatils dont il faut assurer la conservation, préserver la pureté ou limiter l'émission des vapeurs vers l'atmosphère, (figure 1.10).

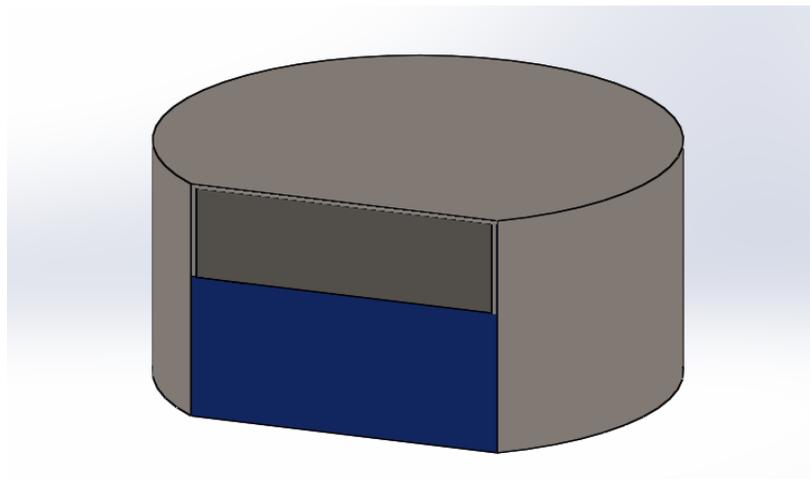


Figure 1.10 : Réservoirs à toit flottant interne

1.3.4. Le choix d'un bac de stockage

Comme il est évident, il y a différents types des bacs qui sont utilisés pour le stockage des hydrocarbures, et pour choisir un bac adéquat au besoin, on doit prendre en considération beaucoup de critères qui régissent le meilleur choix ; parmi ces critères on trouve :

- Considérations techniques :
 - Pression de vapeur et point d'éclair du fluide stocké ;
 - Sensibilité à la corrosion des matériaux ;
 - Le fluide stocké ;
 - La quantité stockée ;
 - Choix de matériau du bac.
- Considérations environnementales et de sécurité :
 - Déversement, fuite et évaporation ;
 - Conditions climatiques (température ambiante, humidité, précipitations, lumière du soleil, etc.) ;
 - Température de stockage ;
 - Résistance aux tremblements de terre et aux catastrophes naturelles ;
 - Les produits stockés à proximité ;
 - Situation géographique et les composantes de la stratigraphie terrestre.
- Considérations de conception :
 - Facilité d'accès au fluide stocké ;
 - Caractéristiques de conception ;
 - Superficie de site de stockage.
- Considérations de coût.

Chacun de ces facteurs est intrinsèquement lié à l'autre. À la lumière des réalités actuelles, de nouvelles considérations telles que les problèmes de sécurité et de sabotage doivent également être prises en compte.

1.4. Conclusion

Pour donner entamer la partie de recherche, nous avons voulu présenter dans ce premier chapitre, les concepts fondamentaux concernant les hydrocarbures qui sont essentiels pour la résolution de la problématique notre thèse.

En premier lieux, nous avons donné un aperçu sur les hydrocarbures en examinant leurs différentes origines, composants, familles, les différences entre ces produits, et en particulier leurs propriétés.

Ainsi, nous avons présenté dans ce chapitre les modes de stockage de ces produits qui doit respecter leurs caractéristiques, où il existe différents types des bacs, qui visent le stockage ces produits dangereux pour le but de raffinage, consommation et/ou de fabrication...etc., ceci explique son importance et son utilité. Ils peuvent être de forme cylindrique, sphérique. Ils sont aériens ou enterrés, horizontaux ou verticaux, en fonction de la nature du produit stockée, son environnement et son utilisation. Les réservoirs sont plus complexes en matière de dimensionnement, d'étude et de prise en charge du volet sécurité .Ils sont en interaction avec le produit stocké, l'environnement extérieur tel que les conditions climatique.

Chapitre 2

Risques liés au stockage d'hydrocarbures

Chapitre 2. Risques liés au stockage d'hydrocarbures

2.1. Introduction

Dans l'intérêt des professionnels de l'industrie de reconnaître toutes les circonstances qui peuvent mettre leur entreprise en danger lorsqu'elle est confrontée à de nombreux risques. Par conséquent, la société humaine est vulnérable à une série de menaces d'ampleur variable résultant des "relations uniques entre la société et l'environnement". La fréquence des catastrophes multiples illustre la difficulté et l'ampleur de ces rencontres. Certains risques peuvent avoir de graves conséquences sociales, matérielles et humaines, d'autres peuvent entraîner des coûts excessivement élevés. Les conséquences humaines, financières et juridiques engendrées de ces dysfonctionnements sont majeures pour la société, les entreprises et leur personnel. Toutes les opérations d'un site industriel créent donc des risques appelés "risques industriels". Les risques résultant de l'activité normale de l'entreprise ne doivent pas être sous-estimés : la maîtrise de ces risques est importante pour toute entreprise. Par conséquent, toute organisation, quel que soit sa taille et son secteur d'activité, doit répondre à ses exigences en matière de santé et de sécurité au travail.

Dans la sécurité, il y a des termes quotidiennement utilisés, ces termes peuvent être intégrés non seulement dans le domaine technique et technologique, mais aussi dans beaucoup d'autres domaines comme le domaine économique et médical ..., et même dans la vie quotidienne. Cette utilisation peut être incorrecte comme l'usage des termes risque et danger. Alors, l'éclaircissement de ces termes par les définir et mettre chacun à sa place, qui est un des objectifs de ce chapitre. Dans autre part, tout le monde est conscience de l'importance de la sécurité dans le domaine de stockage d'hydrocarbure, malgré la faible probabilité de ses risques, leurs gravité est très élevée comme dans le cas du phénomène BOILOVER.

Dans ce cadre, ce chapitre a défini plusieurs risques liés au stockage d'hydrocarbure avec présentation de ses causes et conséquences.

2.2. Notion de base de la sécurité

2.2.1. La sécurité

La sécurité peut être considérée comme un état de tranquillité inspiré par la confiance qu'une menace ne survient pas. Il n'est généralement associé à aucun risque inacceptable.

A ce titre, la sécurité est « *l'absence de risque inacceptable, de blessure ou d'atteinte à la santé des personnes, directement ou indirectement, résultant d'un dommage au matériel ou à l'environnement* » (ISO/CEI Guide 73, 2002). À l'instar de ce qui est fait pour la fiabilité et la disponibilité dans diverses normes, la sécurité d'un système peut être définie en termes d'aptitude : « *la sécurité d'un système est son aptitude à fonctionner ou à dysfonctionner sans engendrer d'événement redouté à l'encontre de lui-même et de son environnement, notamment humain* » (Innal, 2008). Cependant la sécurité fonctionnelle est « *le sous-ensemble de la sécurité globale qui dépend du bon fonctionnement d'un système ou d'un équipement en réponse à ses entrées* » Suivant la norme IEC 61508 (CEI 61508, 1998).

2.2.2. Système

Le terme système a été défini comme : « *un objet doté de finalité qui, dans un environnement, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité* » (Le Moigne, 1990). Tandis que le système a été considéré comme un ensemble d'éléments par la norme CEI 61508 (CEI 61508, 1998) : « *ensemble d'éléments qui interagissent selon un modèle précis, un élément pouvant être un autre système, appelé sous-système, les sous-systèmes pouvant être eux-mêmes soit un système de commande soit un système commandé composé de matériel, de logiciel en interaction avec l'être humain* ».

Donc, un système est un ensemble d'éléments qui sont coordonnés pour interagir les uns avec les autres d'une manière qui peut accomplir une tâche spécifique.

2.2.3. Système de sécurité

Le système de sécurité industrielle est un ensemble des mesures qui visent à protéger les sites dangereux, notamment les usines, comme les usines pétrolières, et ne contrôlent pas leurs processus. Ses objectifs de protection vont au-delà de la protection des installations, car il affecte également l'être humain et son environnement.

2.2.4. Danger et risque

Risque ou bien danger, cette confusion entre les deux restes présente jusqu'à ces jours, surtout que les dictionnaires définissent le danger comme un risque. Pour éliminer cette confusion, il faut d'abord définir les deux termes et éclairer la relation entre les deux.

2.2.4.1. Danger

Le terme danger a connu plusieurs interventions et des points de vue sachant que le Petit Robert (Petit Robert, 1984) a le défini comme "*ce qui menace ou compromet la sûreté, l'existence d'une personne ou d'une chose*", et selon la norme IEC 61508 (CEI 61508, 1998), "*le danger désigne une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux personnes, aux biens (détérioration ou destruction) ou à l'environnement. Les dangers peuvent avoir une incidence directe sur les personnes, par des blessures physiques ou des troubles de la santé, ou indirecte, au travers de dégâts subis par les biens ou l'environnement*". Cependant, le danger est défini comme « une source » dans le référentiel OHSAS 18001 (OHSAS 18001, 2007): « *source, situation, ou acte ayant un potentiel de nuisance en termes de préjudice personnel ou d'atteinte à la santé, ou une combinaison de ces éléments* », et dans la norme ISO 45000 (ISO 45001, 2018) : « *source susceptible de causer traumatisme et pathologie* ».

Pour cela, **le danger** est une source (e.i : énergie électrique, produit chimique, métaux lourds...etc.) qui peut produire un dommage dans la présence d'un récepteur (être humain, environnement ou matériel), ce dommage peut varier entre l'inconfort et la mort.

2.2.4.2. Risque

Le terme « risque » est défini comme un « *danger éventuel plus ou moins prévisible* » selon le Petit Robert (Petit Robert, 1984) ; bien que certaines normes ont adopté une définition indiquant la relation entre le risque, la probabilité de son occurrence et sa gravité, telle que la définition proposée par la norme IEC 61508 (CEI 61508, 1998) : « *Le risque est une combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et de sa gravité* », qui est le même point de vue de la référence OHSAS (OHSAS 18001, 2007), où elle voit que le risque est une « *combinaison de la probabilité de la survenue d'un ou plusieurs événements dangereux ou expositions à un ou à de tels événements et de la gravité du préjudice personnel ou de l'atteinte à la santé que cet événement ou cette/ces exposition(s) peuvent causer* ».

La norme ISO 45000 (ISO 45001, 2018) définit ce terme comme une « *combinaison de la probabilité d'occurrence d'(un) événement(s) ou d'(une) exposition(s) dangereux liés au travail, et de la gravité des traumatismes et pathologies pouvant être causés par l'(les) événement(s) ou la(les) exposition(s)* ».

Donc, un **Risque** est la fréquence et la gravité des dommages dans l'existence de la source (Danger), cette définition est traduite par la formule suivante :

$$R (\text{risque}) = F (\text{fréquence}) * G (\text{gravité}) \quad (2.1)$$

Sachant que :

La fréquence (probabilité d'occurrence) est la répétition avec laquelle un événement indésirable se produit dans une période de temps donnée ;

La gravité est la grandeur et l'ampleur des dommages causés par un événement indésirable.

Pour traduire ce modèle en valeur, une matrice d'évaluation le niveau de risque (figure 2.1), qui va de 1 à 16, a été utilisé.

Gravité		Probabilité d'occurrence			
		Improbable	Peu Probable	Probable	Très probable
4	Mortelle	4	8	12	16
3	Grave	3	6	9	12
2	Moyenne	2	4	6	8
1	Faible	1	2	3	4

Figure 2.1 : Matrice de risque

Sachant que :

- Zone Vert de 1 à 3 : Risque secondaire ;
- Zone Orange de 4 à 8 : Risque important ;
- Zone Rouge de 9 à 16 : Risque favorisé.

2.2.4.3. Relation entre danger et risque

Comme il est évident, il existe une relation étroite entre le danger et le risque. Cette relation a été éclairée par la figure suivante :

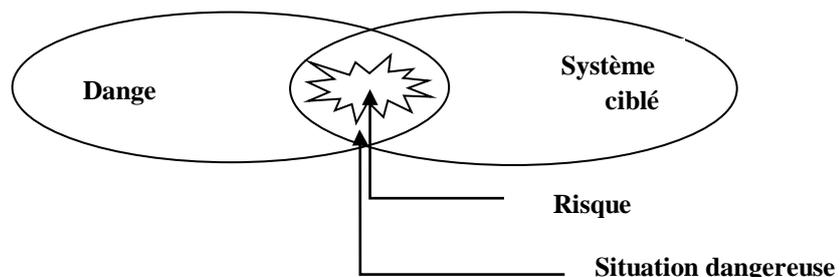


Figure 2.2 : Relation entre les notions de danger et de risque

La figure 2.2 permet de bien apprécier l'interaction entre les notions de danger et de risque (émergence de la notion de situation dangereuse). Où, lorsque le danger et leur récepteur existent, il existe une possibilité d'occurrence du risque.

Donc le **risque** est la projection d'un **danger** sur un récepteur ou système ciblé.

2.2.5. Classification du risque

Dans les littératures il existe plusieurs classifications des risques (Sallak, 2007) ; une de ces classifications c'est de (Tanzi & Delmer, 2006) qui classifie le risque comme suit :

- Le risque naturel : les séismes, les éruptions volcanique, les cyclones, ... ;
- Le risque technologique : le risque de ruptures de barrage, le risque industriel, minier, nucléaire, biologique, ...etc. ;
- Le risque de la vie quotidienne : les accidents domestiques, les accidents de la route... ;
- Le risque lié aux conflits.

Selon la norme NF EN 50126 (NF EN 50126, 2000), la classification du risque était selon la matrice Gravité/Occurrence qui donne 5 types de risque :

- Le risque négligeable ;
- Le risque acceptable ;
- Le risque indésirable ;
- Le risque inacceptable.

Autre classification se basé sur la courbe de *Farmer* (figure 2.3), qui donne les types des risques suivant (Lievens, 1976):

- Risque acceptable ;
- Risque inacceptable ;
- De même courbe on trouve autre type de risque qui connu par **le risque majeur**.

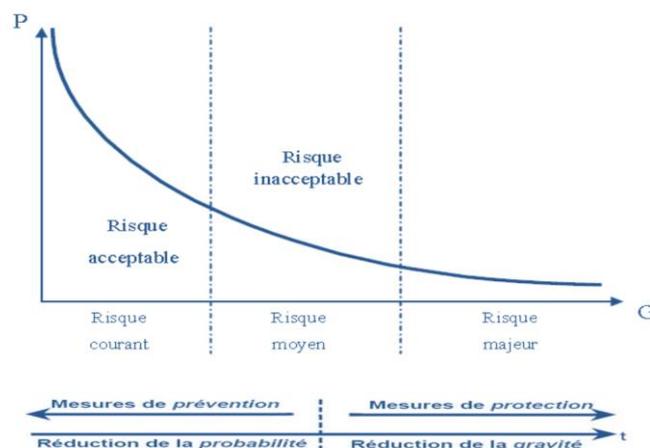


Figure 2.3 : diagramme de Farmer (Lievens, 1976)*

2.2.5.1. Risque acceptable

Ce terme a connu beaucoup d'intervention, on prend par exemple ces définitions: « *Un risque est acceptable en référence à un objectif de sécurité donné* » (GT Aspects sémantiques du risque, 1997), et « *L'acceptation du risque dépend des critères de risques retenus par la personne qui prend la décision* » (ISO/CEI Guide 73, 2002).

D'après le référentiel OHSAS 18001(OHSAS 18001, 2007) : « *risque qui a été ramené à un niveau tolérable par l'organisme au regard de ses obligations légales et de sa politique SST* ».

Les **risques acceptables** sont donc des risques qui sont réduits dans la mesure où l'organisation peut supporter en raison de ses obligations et de sa politique et ne provoque pas d'événements négatifs effectifs, la décision d'accepter le risque est dépend principalement du facteur humain.

2.2.5.2. Risque inacceptable

Le deuxième type des risques est l'inacceptable, qui est selon (Mazouni, 2008) : « *un risque résiduel non tolérable* ». Sachant que le risque résiduel est un « *Risque subsistant après le traitement du risque* » (ISO/CEI Guide 73, 2002).

Les Risques inacceptables: ce sont les risques qui surviennent malgré la prise de toutes les précautions nécessaires, donc le plan d'atténuation et de prévention n'est pas faisable et insuffisant, de ce fait en recourant à l'activation du plan de protection pour maîtriser ces risques.

2.2.5.3. Risque majeur

Les risques majeurs sont les risques d'origine naturelle ou technologique. En général, une fréquence faible et une gravité élevée caractérisent ce type de risque, ceci est représenté par la courbe de Farmer. Les risques majeurs se traduisent par un grand nombre de victimes, un impact négatif sur l'environnement et des dommages matériels importants (Tanzi & Delmer, 2006).

2.3. Étude de danger

Le but de l'étude des risques est d'identifier toutes les sources de risques susceptibles de nuire aux humains, à l'environnement ou aux équipements.

Il vise également à identifier les scénarios qui conduisent à des accidents, leurs causes et leurs conséquences, pour élaborer des plans d'intervention efficaces et adaptés aux risques industriels présents sur la zone de travail.

2.4. Management des risques

Le terme de management des risques est cité dans la norme ISO 31000 (ISO/FDIS 31000, 2009) comme : *«activités coordonnées dans le but de diriger et piloter un organisme vis-à-vis du risque»* et le processus de ce management est selon la même norme : *« application systématique de politiques, procédures et pratiques de management aux activités de communication, de concertation, d'établissement du contexte, ainsi qu'aux activités d'identification, d'analyse, d'évaluation, de traitement, de surveillance et de revue des risques ».*

Ainsi, toutes les entreprises s'efforcent de gérer leurs risques afin d'être plus sûres et à l'écart des événements redoutables qui accompagnent leurs activités, à travers deux processus principaux (figure 2.4), dont le premier est l'appréciation des risques qui est généralement basée sur 3 étapes consécutives :

L'identification des risques, cette étape repose sur le reconnaître et le décrire l'origine, les causes et les conséquences des risques par la surveillance continue et des méthodes orienté aux ce but comme l'**APR**, **nœud de papillon** et **AMDE** ; ensuite l'analyse des risques est la base de l'étape prochaine, on va présenter l'analyse des risques en détaille par la suite, la 3eme étape est l'évaluation des risques c-t-d la comparaison de risque trouvé dans les étapes précédentes par les critères des risques qui peut par la suite le juger et prend une décision à propos la situation, dans l'évaluation on peut utiliser la grille de risque...etc.; le management de risque se termine par son traitement qui signifie la réduction de risque qui nous développerons plus tard.

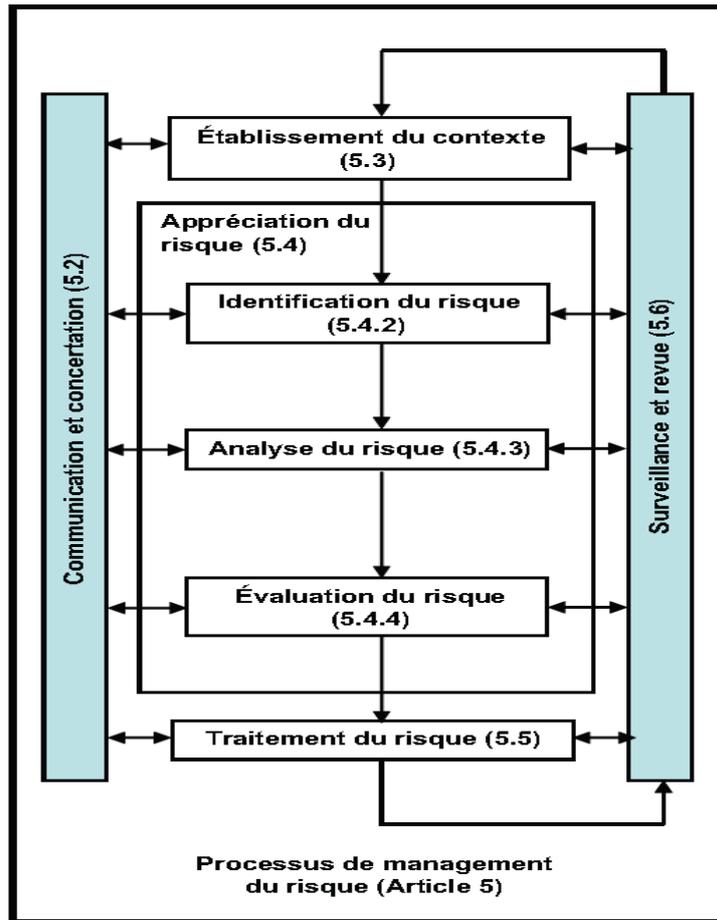


Figure 2.4 : Processus de management de risque (ISO/FDIS 31000, 2009)

2.5. Analyse des risques

L'analyse des risques est définie par la norme ISO 31000 (ISO/FDIS 31000, 2009) comme : « processus mis en œuvre pour comprendre la nature d'un risque et pour déterminer le niveau de risque », et selon le Guide ISO/CEI 51 (ISO/CEI Guide 51, 1999) est : « l'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux et estimer le risque ».

D'après ces définitions, on constate que l'analyse des risques se compose principalement de deux points pivots, respectivement :

La première étape est de définir et de comprendre toutes les hypothèses et les sources qui mènent à un risque dans le système étudié, et à partir de là, déterminer en utilisant l'une des méthodes concernées, telles que la méthode APR, MADS/MOSAR...etc. Cette étape est considérée comme très importante dans l'analyse des risques.

L'estimation de ces risques en termes de probabilité de survenance et de gravité, comme une deuxième étape, en utilisant des méthodes spéciales qui ont généralement une caractéristique quantitative comme la méthode AMDEC.

Où cette analyse est destinée à diminuer les risques globaux sur l'homme, l'environnement et les équipements, pour cela différentes méthodes sont utilisées en fonction des résultats à obtenir et du système à étudier.

2.5.1. Outil d'analyse les risques

Il n'y a pas un outil unique permettant à toutes les organisations de tous secteurs et de toutes tailles, pour analyser leurs risques afin de déterminer des mesures préventives, et en conséquence d'analyser les risques, il existe plusieurs outils tels que modèles, logiciels et méthodes ... et cette diversité est due à la nature des risques et à leur environnement.

2.5.1.1. Simulation et Modélisation pour l'analyse de risques

La simulation et la modélisation sont d'une grande importance dans l'analyse des risques, en particulier après le développement observé. Ces outils de recherche sont utilisés dans le cas où le cursus théorique n'est pas suffisant et il était difficile d'utiliser la méthode expérimentale en raison de la sécurité, du matériel, du temps, ou à cause de la multitude des facteurs.

La simulation et la modélisation permettent de reproduire un phénomène physique complexe par une machine artificielle (un ordinateur par exemple), dont on souhaite étudier son développement, ce qui donne accès à une grande quantité d'informations difficile à mesurer expérimentalement, et offre la possibilité de procéder simplement un grand nombre d'expériences en temps opportun (Albrecht et al., 2007; Courdec, 2012), ce concept est traduit dans la figure 2.5.

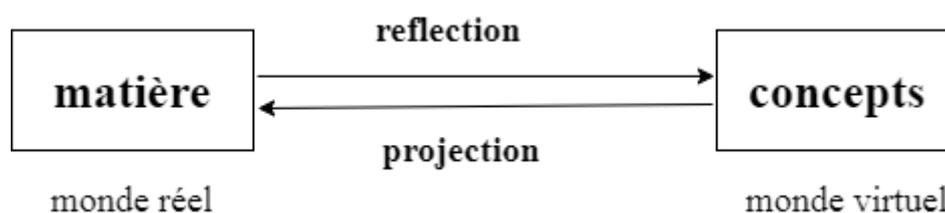


Figure 2.5 : Représentation du concept de la simulation et la modélisation selon (Evans, 1988)

Alors que (Ye, 1994) voit la simulation est «une technique de modélisation qui consiste à reproduire le comportement dynamique d'un système sur ordinateur afin de mieux le connaître, de mieux maîtriser son évolution dans le temps dans un environnement donné; et d'évaluer ses performances».

Et pour la modélisation : «Le mot modèle comporte deux aspects essentiels: un modèle peut refléter la réalité et prédire les événements et les phénomènes réels qui se heurtent à nos

idées, ou il peut servir comme une forme (référence) idéale ou un phénix (parangon) avec lequel nous voulons agir sur la réalité» (Ye, 1994) .

C'est clair qu'il y a une différence entre les deux termes où la modélisation est de générer un model physique ou digital, bien que la simulation est une procédure qui utilise ce model pour étudier un système (Taleb Berrouane Mohammed, 2017).

Pour la simulation et la modélisation, il existe divers outils et cela selon les données, les informations initiales et les résultats voulus ; ces outils varient d'une simple méthode passant par des logiciels aux stands programmés.

Où on trouve un grand nombre de logiciels dirigés pour cette raison et le choix est en fonction de domaine d'étude comme mentionné avant, on prend par exemple la modélisation numérique thermique des incendies qui consiste deux types de modèles : modèle de zone et modèle de champ comme mentionner dans la figure 2.6.

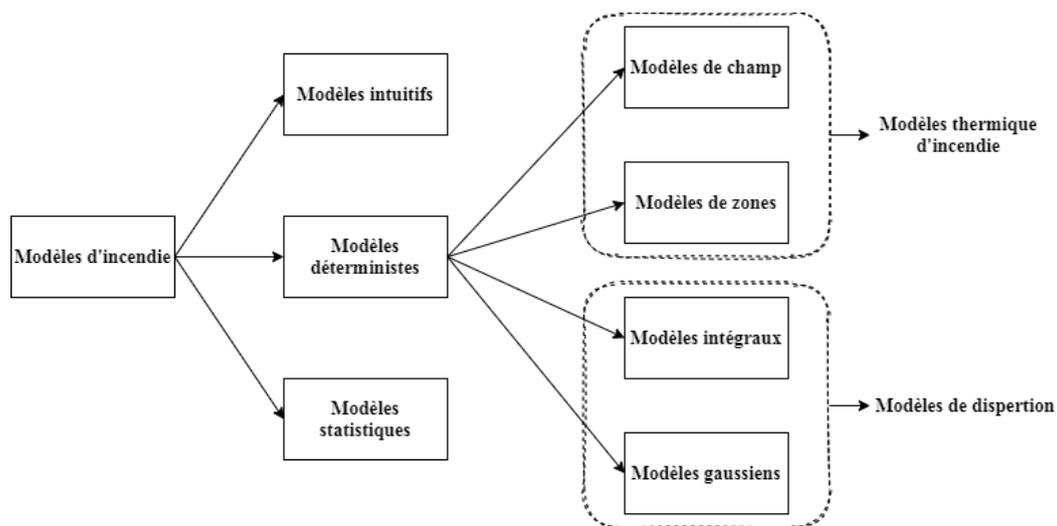


Figure 2.6 : Les modèles d'évaluation d'incendie selon (Chettouh et al., 2013)

Les modèles de zone sont utilisés pour évaluer la propagation des fumées et le transfert de chaleur des incendies pendant de nombreuses années et à grande échelle, et cela à cause de sa rapidité d'obtenir les résultats (Chettouh et al., 2013). Parmi ces logiciels on peut citer: Smoke Pro, CFAST / FAST, Ozone V2, ...etc.

Dans les modèles de champ, on trouve le code CFD (Computational Fluid Dynamics) ou modèle numérique 3D, ce type d'outil permet d'étudier en détail des phénomènes d'incendie complexes tels que les phénomènes radiatifs, le transfert thermique, la propagation et les flux résultant d'un incendie... etc., (Desanghere, 2006). Parmi ces logiciels il y a: FDS, CFX, Fluent, ...etc.

2.5.1.2. Les modèles d'analyse de risque

Il existe plusieurs approches pour mettre en œuvre un modèle d'analyse des risques, et ces approches se divisent en deux catégories principales fonctionnelle et systémique (Rolland, 1986; Ye, 1994).

2.5.1.2.1. Approche fonctionnelle

L'approche ou l'analyse fonctionnelle est une approche basée sur l'identification et l'évaluation des fonctions qui doit effectuer par le système étudié, parmi les méthodes d'analyse fonctionnelle on trouve (SADT, FAST (**function analysis system technique**)... etc.).

- **La méthode SADT** : « Structured Analysis and Design Technical » est une méthode fonctionnelle inductive qui présente graphiquement la décomposition d'un système complexe. Elle est utilisée dans les systèmes ou les logiciels (Hammouya & Chaib, 2020; Marca & McGowan, 1987) . La figure 2.7 illustre le schéma général de cette méthode.

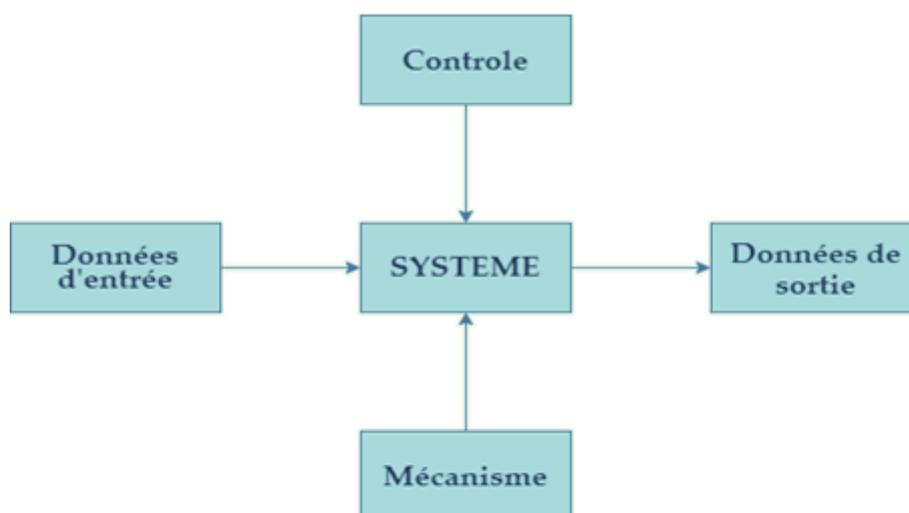


Figure 2.7 : Schéma général de la méthode SADT

Il y a deux types de diagrammes de la méthode SADT soit actigramme ou datagramme, parmi les différences entre les 2 sont : l'entrée et la sortie dans le premier cas sont des données (nom), mais dans le deuxième sont des activités (verbe), aussi le système dans l'actigramme est une activité par contre dans le datagramme est une donnée. Cette méthode a plusieurs avantages dont on peut citer :

- La facilité d'application ;
- Facile à lire grâce à la clarté de ses graphismes ;
- Sa communication non "informatique" ;
- Promouvoir le travail en groupe (communication) ;

- Et ses résultats sont dus à l'efficacité de l'analyste plus qu'à la précision de cette méthode (Ye, 1994).

2.5.1.2.2. Approche systémique

L'approche systémique est une approche ou une analyse holistique et complexe qui dépend de la collecte, de l'organisation de l'information et de la division en systèmes, cette complexité selon (Le Moigne, 1990) est représentée dans le phénomène étudié en lui-même ou dans son nombre, on trouve comme méthodes de ce modèle : MADS, MoDyF..., etc.

- **Modèle de danger MADS :** Le modèle MADS est le premier outil pédagogique pour modéliser l'idée de danger (Froquet, 2005), et sur la base de la proposition de Le Moigne (Giraldo, 2007), décrit une description complète des relations de systèmes synthétiques enregistrés dans un environnement de «champ de danger» (figure 2.8 ; (Périlhon, 1999)) en reliant le système source et cible à travers le phénomène des flux de danger, qui décrit les interactions non souhaitées entre le système et son environnement, basée sur des zones de danger qui sont des relations temporelles et spatiales très spécifiques lorsque l'interaction se produit entre les sources et les cibles.

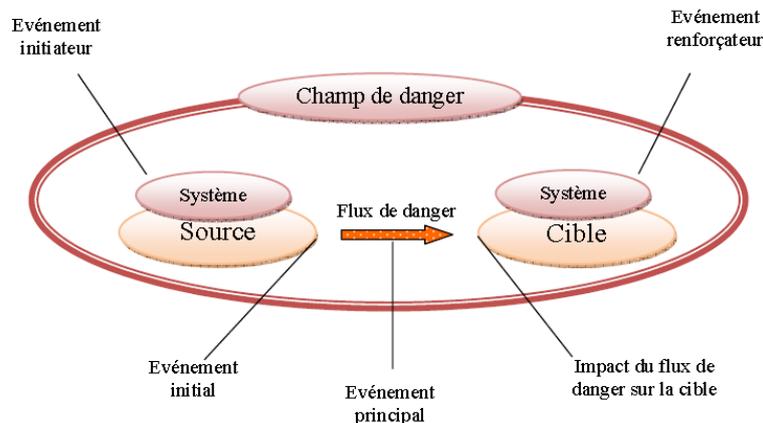


Figure 2.8 : Processus du modèle MADS selon (Périlhon, 1999)

2.5.1.3. Les méthodes d'analyse des risques dédiée aux barrières de sécurité

Premièrement on doit passer par les méthodes Arbre de défaillance et arbre d'évènement car ils sont la base des autres méthodes dans cette section.

2.5.1.3.1. L'Arbre de défaillance (AdD)

La méthode de l'Arbre de défaillance ou arbre des causes est une méthode probabiliste et déductive, elle a été inventée par H.A. Watson et M. A. Mearns en 1961, elle a

été utilisée la première fois dans le domaine des armes aériennes américaines (Ericson & LI, 1999).

L'AdD est basé principalement à l'identification des causes qui peuvent amener un événement indésirable jusqu'à l'arrive à un niveau basic et non composable des causes, à l'aide d'une structure graphique arborescente et symbolisée (Figure 2.9) (Mihalache, 2007).

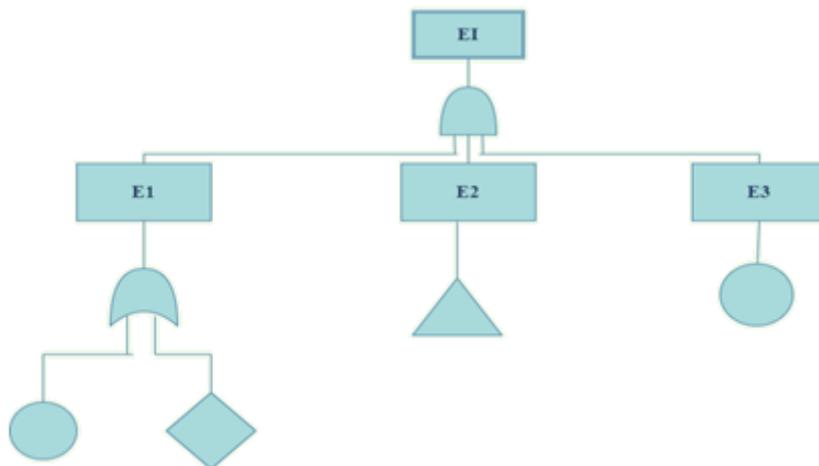
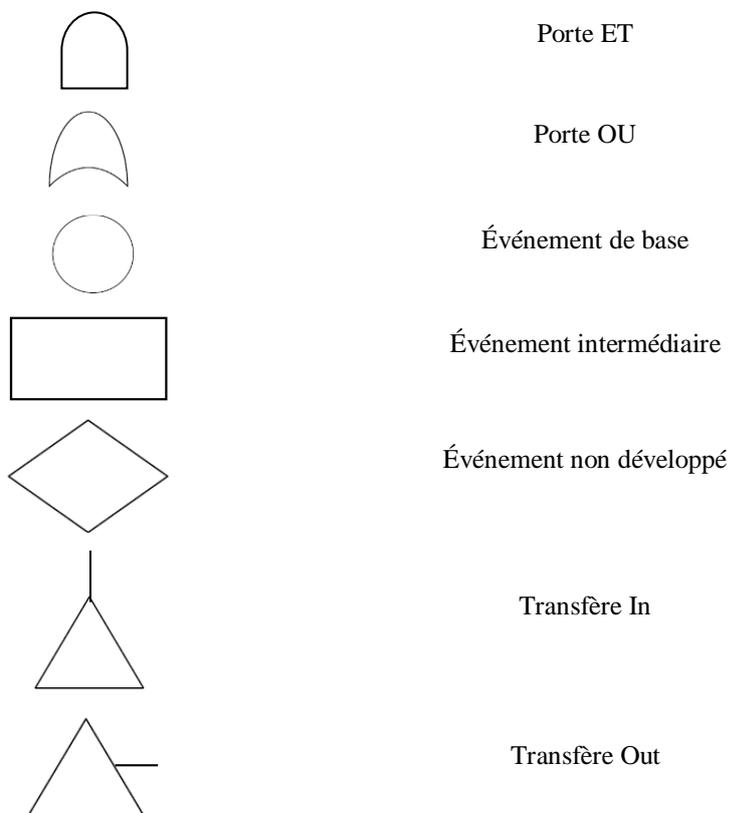


Figure 2.9 : Schématisation d'un arbre de défaillance

Avec



2.5.1.3.2. *Arbre d'événement*

La méthode de l'Arbre d'Événements (Fumey, 2001; Mihalache, 2007), ou en anglais Event Tree, et également appelée l'Arbre des Conséquences est une méthode inductive. Elle a été utilisée la première fois dans les années 1970 dans les centrales nucléaires des états unis. Cette méthode caractérise par un événement initial, des événements secondaires ou des barrières, et en fin les conséquences de chaque scénario du succès ou d'échec (Figure 2.10).

Elle se déroule en quatre étapes :

- La Définition l'événement initiateur ;
- L'Identification les fonctions de sécurité ;
- La Construction l'arbre ;
- L'Exploitation les conséquences d'arbre.

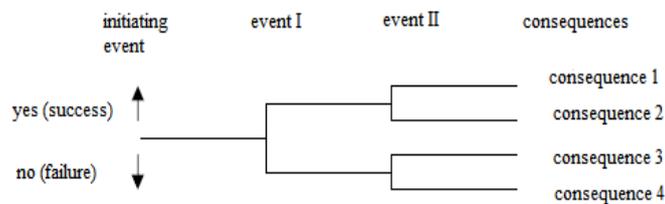


Figure 2.10 : Schématisation d'un arbre d'événement

2.5.1.3.3. *Nœud de papillon*

La méthode nœud de papillon est une méthode d'analyse de risque du type arborescent créée en 1971 par Nielsen (de Ruijter & Guldenmund, 2016), puis il a connu plusieurs développements dans les années 1990 (Yazdi, 2017), C'est une méthode qui étudie les risques en termes de causes, de conséquences et des barrières de sécurité de prévention et de réduction ; ainsi, il est principalement composé de l'arbre de défaillance et de l'évènement centré sur un même événement redouté (Figure 2.11), (HAMMOUYA et al., 2021; Hammouya & Hammouya, 2021a).

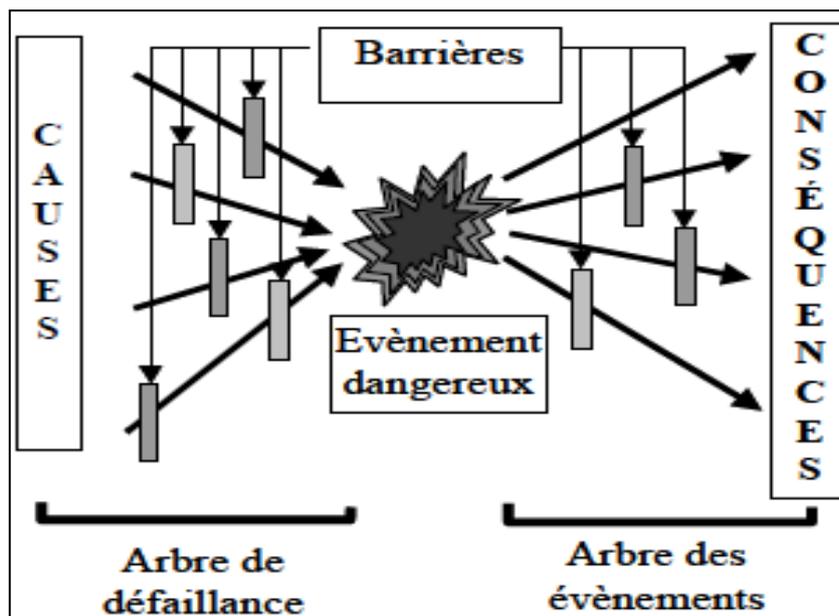


Figure 2.11 : Schématisation de nœud de papillon (De Dianous & Fiévez, 2006)

2.5.1.3.4. La méthode BORA

BORA « Barrier and Operational Risk Analysis » est une méthode inductive, cette méthode se compose de la méthode blok barrier et la méthode arbre de défaillance (Bourareche et al., 2020). Elle a été inventée par les chercheurs norvégiens : Terje Aven, Jan Erik Vinnem et Snorre Sklet..., dans la période de 2003 et 2006, et appliquée sur une plateforme de production de pétrole et de gaz norvégien.

Elle est basée sur la définition des fonctions des barrières de système du premier évènement à l'étude de scénarios liés à l'échec ou au succès de ces barrières. (Figure 2.12) (Seljelid et al., 2007; S. Sklet et al., 2005; Snorre Sklet, 2006; Vinnem et al., 2004).

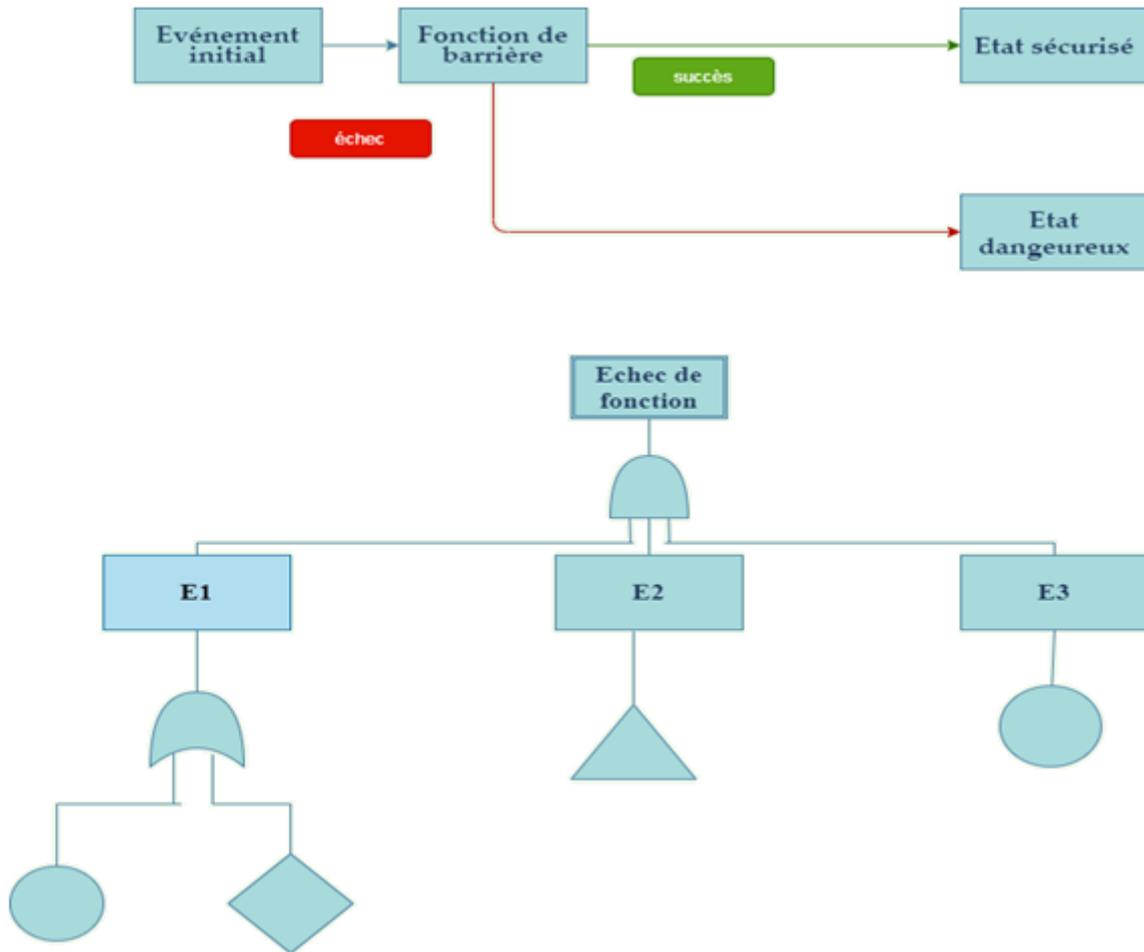


Figure 2.12: Schéma général de la méthode BORA

2.5.1.3.5. Analyse des modes des défaillances et effets (AMDE)

C'est une méthode qualitative et inductive d'analyse les causes et des conséquences d'une défaillance de chaque composant d'un système. Elle a été utilisée pour la première fois en 1960 dans le domaine de l'aviation.

L'AMDE est réalisé en quatre étapes:

- Définir le système étudié, ses fonctions et ses composants ;
- Définir les modes de défaillance des composants du système et leurs causes ;
- Étudier les conséquences de défaillance des composants ;
- Conclusions recommandations (Almannai et al., 2008; Hammouya & Kabouche, 2017) (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : La méthode AMDE

Système					
Sous système	Mode de Fonctionnement	Mode de défaillance	Cause	Conséquence	Observation

2.5.1.3.6. La méthode LOPA

LOPA (Layer of Protection Analysis) c'est-à-dire : Analyse des niveaux de protection, elle est une méthode semi-quantitative inventée par le CCPS (Center for Chemical Process Safety) en 1990. Cette méthode a été utilisée pour l'évaluation des contributions des barrières de sécurité sur les scénarios d'accidents de procédé industriels chimiques, pétrochimiques et nucléaires (explosion, incendie, rejets de produits chimiques, etc.) (Bacha et al., 2021; Hariz & Telli, 2019). La méthode LOPA a pour but de:

- L'identification des couches de protection indépendantes ;
- La détermination du niveau de risque résiduel global, en intégrant les différentes couches de protection ;
- L'évaluation de la nécessité de réduire le risque résiduel en rajoutant une couche de protection réalisée par un Système Instrumenté de Sécurité (SIS) répondant à une fonction de sécurité instrumentée (SIF) ;
- La sélection du SIL (« Safety Integrity Level » ou « niveau d'intégrité de sécurité ») des SIS. (Puello et al., 2020; Torres-Echeverria, 2016) .

L'analyse comporte plusieurs étapes: d'abord, l'effet de l'événement redouté (gravité) est déterminé par une analyse qualitative des risques utilisant des méthodes spécifiques, par exemple HAZOP, APR et AMDE; Il faut ensuite déterminer les événements initiateurs. L'étape suivante consiste à définir toutes les couches de protection qui empêchent la propagation de l'événement initiateur menant à l'événement redouté; ensuite, il faut déterminer la fréquence de l'apparition d'événements, Il est suivi d'une évaluation de la robustesse des classes de protection en probabilité de défaillance à la demande. Et à la fin, le calcul de la fréquence de l'événement redouté.

2.5.1.3.7. Les approches d'analyse de la fiabilité humaine

Une analyse de la fiabilité humaine «human reliability analysis (HRA)» est une évaluation systématique qui évalue la probabilité d'erreurs humaines et leur impact sur les performances et la sécurité du système (Galizia et al., 2015).

Tandis que la fiabilité humaine selon (Leplat & Cellier, 1990)est « l'opportunité des opérateurs à atteindre des buts implicites et explicites à l'intérieur des limites acceptables », et d'après (Nicolet & Celier, 1985) la fiabilité humaine est considérée comme : «La probabilité qu'un individu, une équipe, une organisation humaine accomplisse une mission

dans des conditions données à l'intérieur des limites acceptables, pendant une certaine durée».

Quant à l'erreur humaine selon (Villemeur, 1988): « *c'est l'écart entre le comportement de l'opérateur et ce qu'il aurait dû être, cet écart dépassant des limites d'acceptabilité dans des conditions données* ».

HRA est réalisée en 3 étapes: analyse des tâches, identification de l'erreur humaine et évaluation de la fiabilité humaine (Mazouni, 2008).

Pour évaluer la fiabilité humaine il ya aussi nombreuses méthodes, telles que la méthode **THERP**: « Technique for Human Error Rate Prediction»: Technique de prédiction du taux d'erreur humaine, la méthode **TESEO** : « Tecnica Empirica Stima Errori »: erreurs d'estimation de technique empirique, et la méthode **SLIM**: « Success Likelihood Index Method »: Méthode de l'indice de probabilité de succès...etc.

2.6. Réduction de risque

La Réduction de risque est « *Actions entreprises en vue de diminuer la probabilité, les conséquences négatives (ou dommages), associées à un risque, ou les deux* » (ISO/CEI Guide 73, 2002).

Et d'après (Mazouni, 2008) :« *La réduction des risques est l'ensemble des actions entreprises en vue de diminuer la gravité des conséquences (protection), les probabilités d'occurrence (prévention) ou les deux en même temps. Ça pourrait concerner la réduction des temps d'exposition et la multiplication des possibilités d'évitement des situations dangereuses* ».

La procédure de **réduction des risques** comprend donc toutes les barrières ou dispositions qui limitent la probabilité ou la gravité des risques, généralement, les barrières de prévention utilisée pour réduire la probabilité et cela de protection utilisée pour baisser la gravité selon la courbe de *Farmer* (Lievens, 1976) (figure2.3).

Donc pour réduire le risque, il suffit de réduire sa probabilité et sa gravité par l'utilisation des barrières nécessaires et appropriées.

Mais la norme ISO 45001(ISO 45001, 2018) résume la réduction de risque en 5 points suivants :

- a) Elimination de danger;
- b) Remplacement le danger par des procédés, des opérations, des matières ou des équipements moins dangereux;
- c) Plantation des barrières de protection collective et réorganisation de travail;

- d) Utilisation des barrières de prévention administratives, y compris la formation;
- e) Utilisation des EPI « équipements de protection individuelle » appropriés aux tâches demandées.

2.7. Les risques liés au bac de stockage

Le stockage des hydrocarbures comporte plusieurs risques qui sont de faible probabilité, mais dont les conséquences peuvent être catastrophiques, à savoir les dangers physiologiques, de pollution de l'air, de sol et de l'eau, dangers d'incendie et d'explosion. Parmi ces dangers, on peut citer les phénomènes suivants (Figure 2.13):

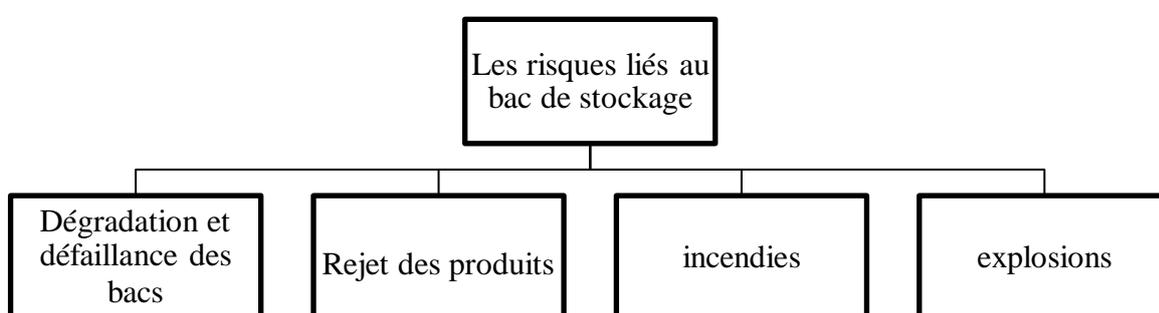


Figure 2.13: Les risques liés aux bacs de stockages

2.7.1. Dégradation et défaillance des bacs de stockage

Naturelle ou non, les origines de défaillance des bacs de stockage se varient, elle a été causée probablement par le chargement et de déchargement du produit stocker, la surcharge, les conditions climatiques tel que le vent, la température ...etc., Les types les plus reconnus sont :

2.7.1.1. Corrosion

La corrosion est une réaction inter-faciale naturelle et permanente d'un matériau avec son environnement qui entraîne sa dégradation ou sa dissolution.

La corrosion de nature électrochimique ou bactérienne est une méthode primaire de détérioration des bacs de stockage, qui peut affecter à la fois intérieurement et extérieurement, localement ou généralement tous les éléments du bac, (Figure 2.14).



Figure 2.14 : Exemple de corrosion d'un bac de stockage (cas du dépôt de stockage de Sidi Rcine–Alger)

2.7.1.2. Tassement

Le tassement, c'est une déformation verticale du sol sur lequel le réservoir est basé; il se produit généralement à cause des contraintes externes continues, de la non-conformité du sol de base aux normes et exigences, l'erreur humaine ou des conditions naturelles comme sécheresse des couches superficielles et l'existence de l'eau sous les fondations... etc.

Le tassement a plusieurs formes telles que: le tassement uniforme, l'inclinaison plane et le tassement non uniforme (Bahar et al., 2011), (Figure 2.15 et 2.16).



Figure 2.15 : Tassement dû au tremblement de terre de d'Izmit, (Turquie 1999) (Partie, 2014)



Figure 2.16 : Tassement dû au tremblement de terre d'Emilia (Italie 2012) (Brunesi et al., 2015)

2.7.1.3. Fissure

Les fissures peuvent apparaître en fonction de la qualité des matériaux du réservoir. Les fractures se manifestent généralement dans les zones soumises à des restrictions extrêmes. Ces fissures peuvent être causées par la corrosion bactérienne et la surcharge, chargement/déchargement de produit, mauvais soudage... etc., (Figure 2.17).

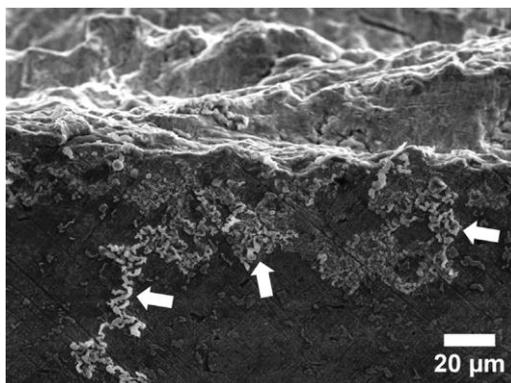


Figure 2.17 : Vue d'une bouche de fissure causée par la corrosion biologique selon (Sowards et al., 2014)

2.7.1.4. Déformation

Généralement, les déformations du bac dû à plusieurs facteurs, on prend par exemple les facteurs climatiques comme la vitesse du vent qui arrivé parfois à certaine valeur agressive peut engendre des déformations au bac, parmi les facteurs on trouve aussi la pression successive interne ou externe accidentelle, aussi le chargement et le déchargement de produit peut déformer les bacs de stockage (Figure 2.18).



Figure 2.18 : Déformation d'un bac à Rincon de los Sauces2006 à cause du vent, selon (Jaca & Godoy, 2010)

2.7.2. Rejet des hydrocarbures

Le rejet des hydrocarbures, dus au son stockage, est l'un des pires types des accidents de ce secteur pouvant résulter d'une fissure dans le réservoir, et se caractérise généralement

par une basse fréquence et une forte gravité (Crowl & Louvar, 2001). Ce phénomène peut se transformer en incendie ou explosion, sachant qu'il existe deux formes de rejet selon l'état de produit stocké : liquide (Figure 2.19) ou gazeux, tandis que les pertes par évaporation d'hydrocarbures ont reçu plus d'attention que les déversements liquide (bien que ceux-ci soient liés) (Hammouya & Hammouya, 2021; Hilpert et al., 2015). Cette différence détermine la nature du phénomène probable suivant.



Figure 2.19 : Contamination de rivière d'Ambarnaya par le rejet d'hydrocarbures (russe, 2020)
(FRANCE 24, 2020)

2.7.3. Incendie

L'origine de ce mot est latin et dérivé de « incendium, de incendere » (*Petit Larousse Illustré*, 1919).

L'incendie est l'accident le plus ré pondu dans l'industrie des hydrocarbures, c'est une réaction d'oxydoréduction très rapide entre les hydrocarbures et l'oxygène de l'air ambiant, cette réaction libère de l'énergie qui provoque une augmentation de la température ambiante et des produits stockés à proximité du produit brûlé (Peters, 2001).

Ainsi, l'incendie a été considéré comme un phénomène de combustion incontrôlable, car il y a plusieurs facteurs qui contribuent à la complexité de l'état comme les modes de transfert de chaleur, la fumer, les braises ... etc., qui peuvent entraîner d'autres complications comme l'explosion, l'effet de dominos, la pollution de toutes ces formes (air, eau et sol), en plus des pertes humaines et économiques.

Cette réaction inclut plusieurs phénomènes liés aux hydrocarbures comme :

2.7.3.1. Jet de feu

Le phénomène de jet de feu est considéré selon la norme **ISO 14692-1:2017** (ISO14692-1. 2017, n.d.) Comme : «*Flamme de diffusion turbulente résultant de la combustion d'un combustible libéré en continu avec une impulsion significative dans une direction particulière*».

Un jet de feu appelé aussi « jet fire » peut être considéré comme un accident major accompagné d'une pression élevée, où cet élan amène le produit stocké à se mélanger avec l'atmosphère (figure 2.20), la probabilité d'occurrence de ce phénomène est la plus faible parmi les autres incendies des hydrocarbures avec 5% (Gómez-Mares et al., 2012).



Figure 2.20: Vue de l'accident de jet de feu de Ghislenghien 2004 (Belgique), selon (Jolly & Leroy, 2014)

2.7.3.2. Feu de nuage

Le Feu éclair ou le Flash fire est un type des feux connu, représentant 29% de tous les types d'incendies d'hydrocarbure (Gómez-Mares et al., 2012). Ce type d'incendie commence par une fuite de gaz ou de vapeur dans l'atmosphère et se propage à cause du vent, une fois qu'il trouve une étincelle, il s'enflamme très vite (il n'explose pas) et pendant une courte durée.

Il se caractérise par sa vaste superficie et ses dommages relativement faibles, mais les brûlures qu'il provoque peuvent également entraîner la mort si elles sont graves.

2.7.3.3. Feu de nappe (POOLFIRE)

Selon la norme ISO 13702 (ISO 13702, 2015) le feu de nappe est: «*feu de diffusion turbulent brûlant au-dessus d'un bassin horizontal d'hydrocarbures en phase de vaporisation dans des conditions où le carburant a une impulsion initiale nulle ou très faible*».

Ce type d'incendie est principalement dû à la fuite du liquide stocké dans le bassin de protection et à la présence d'une étincelle ou à l'arrivée du liquide à une température critique, surtout s'il est stocké à une température inférieure ou égale à la température ambiante. Le feu

de nappe est l'un des incendies d'hydrocarbures les plus fréquents, car il représente un pourcentage de 66 % de tous les types de feu (Gómez-Mares et al., 2012).

2.7.4. Explosion

L'explosion est une transformation d'une substance en une autre substance à grande vitesse, accompagnée de la libération d'une grande quantité d'énergie chimique ou physique dans un court laps de temps, cette énergie se traduit par la production d'une onde de pression qui caractérise le régime d'explosion. Si cette onde est faible donc le régime dit déflagration, dans le cas où l'onde est forte le régime est dit détonation, alors on trouve deux (02) régimes d'explosion (Baker et al., 2012; Duong, 2012; ISO:13702, 1999).

En général l'onde de pression a été accompagnée par des flammes, qui se déplacent plus vite que la vitesse du son, par opposition à son mouvement dans le phénomène d'incendie où elle est inférieure à la vitesse du son (340,29 m / s) (Nolan, 1996), en plus des substances toxiques, de la fumée et des éclats d'obus. Les explosions les plus reconnues au sein de l'industrie d'hydrocarbure sont :

2.7.4.1. BOILOVER

Le phénomène Boil-Over est causé par l'existence de l'eau au fond du bac de stockage rempli d'un des produits qui support ce phénomène, donc l'échauffement contenu de ce produit provoque l'évaporation de l'eau qui peut projeter les gouttelettes de produit enflammées, cette projection forme la boule de feu (Figure 2.21).

Pour savoir le produit stocké support le phénomène ou pas, il faut vérifier si le POB (Propensity to Boil Over) est supérieur ou égal à 0.6, car s'il est inférieur à cela, le produit ne supporte pas le boil-over.

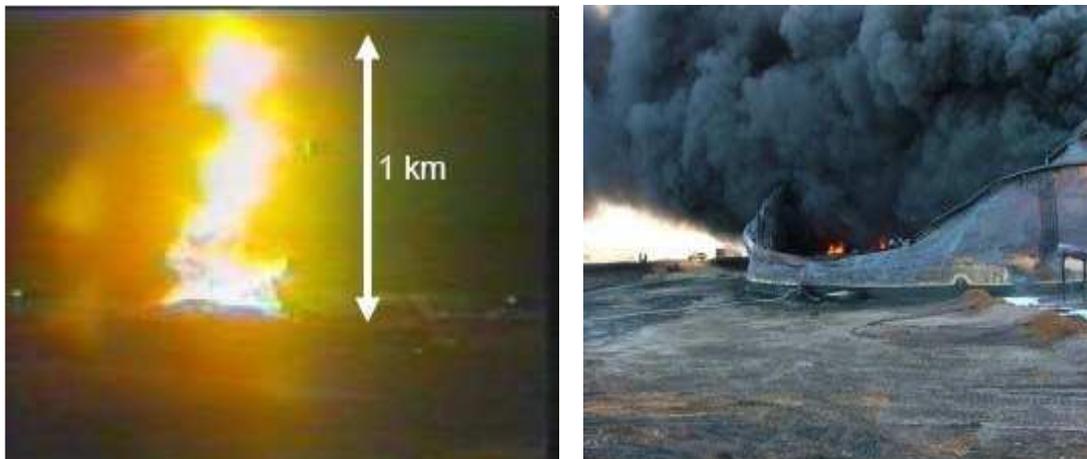


Figure 2.21 : Vu de boil over de Skikda (Algérie, 2005) selon (Hamzi, 2008)

2.7.4.2. BLEVE

BLEVE est l'abréviation de « Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion », c'est à dire: « Explosion de Vapeurs en cours de Détente, émise par un liquide en Ébullition ».

Le BLEVE est résultant généralement par un échauffement contenu de liquide stocké qui résulte évaporation de ce liquide et élévation de pression, donc une rupture et une étincèle peut produit ce type d'explosion. BLEVE est une violente évaporation explosive qui fait suite à la rupture d'un bac contenant du liquide à une température bien supérieure au point d'ébullition à pression atmosphérique.

Alors le BLEVE est relié au changement d'état de produit stocké et non pas résulter par la réaction de combustion, donc ce n'est pas obligatoire que le produit être inflammable pour provoquer un BLEVE. Généralement, le phénomène BLEVE est relié aux réservoirs de stockage des gaz liquéfiés inflammables comme les GPL et GNL, (Figure 2.22).



Figure 2.22 : Vu du BLEVE de Feyzin (France1966) selon (Spdu10, 2016).

2.7.4.3. La pressurisation

La pressurisation est une explosion pneumatique ; cela se produit généralement lors du stockage des produits cryogéniques, qui sont stockés à basse température et haute pression comme les GNL. Le Responsable de ce phénomène est l'expansion de gaz comprimé et la forme du réservoir, donc la déformation du bac de stockage peut conduire à son apparition.

Jusqu'à présent, la pressurisation ne peut être prédite avant son arrivée, en raison de la complexité du mécanisme de son apparition.(Duong, 2012; Fu et al., 2013; Seo & Jeong, 2010).

2.7.4.4. Explosions de nuage inflammable (UVCE)

« UNCONFINED VAPOUR CLOUD EXPLOSION » est une explosion d'un nuage de gaz / vapeur inflammable non confiné, (Figure 2.23).

En commençant par la propagation de gaz et de vapeurs combustibles dans l'atmosphère, accompagnée de pression, après l'apparition de la première étincelle, l'explosion se produit, accompagnée d'un rayonnement thermique et d'effets mécaniques.



Figure 2.23 : Vue d'un UVCE (Buncefield, Royaume-Uni 2005) selon (Bradley et al., 2012)

2.7.4.5. ROLLOVER

Le ROLLOVER, ou Phénomène de basculement de couches est un processus qui se produit dans des réservoirs de GNL de grandes capacités qui se compose de deux couches séparées par un diélectrique où après un transfert thermique, conduisant ainsi à l'évaporation rapide d'une grande quantité de gaz liquéfiés provoquant un renversement soudain du liquide et un mélange brusque. Au fil du temps, la couche inférieure devient plus chaude, ce qui entraîne un risque d'explosion.

2.7.5. Les causes et conséquences des risques liés au bac de stockage

Le tableau ci-dessous résume les causes et les conséquences des phénomènes précédentes.

Tableau 2.2 : Les causes et conséquences des risques liés au bac de stockage

Phénomène		Causes	Conséquences	Exemple
Rejets		Dommages ou fatigues mécaniques Corrosion Fuite	Pollution Feu de nappe	2020, Norilsk Russie
Dégradation	Corrosion	Pollution Mauvais revêtement Condition climatique Pluie acide Produits agressifs	Déformation du bac Rejets des produits	2006 Sharjah, UAE
	Tassement	Tremblement de terre Conditions climatiques Déformations en pied de bac Erreur humaine	Déformation du bac Rejets des produits pressurisation	les années 1980, Bejaia, Algérie
	Fissure	Corrosion Erreur humaine	Rejet de produit Pollution Effets toxiques Incendie/explosion	2014, Sidi Rcine Algérie
	Déformation	Le vent Surpression Charge/décharge	Pressurisation	2006, rincón de los sauces, Argentine
Incendie	Feu de Jet	Corrosion Fissure Erreur humaine	Effets dominos Effet thermique Effet toxique Blessé et mort	2004, <u>Ghislenghien</u> , Belgique
	Flash fire	Rejet des gaz et des vapeurs Étincelle autour de la zone Non-respect de norme au travail Corrosion Fissure Erreur humaine	Effet thermique Produits dangereux Effets dominos Blessé	1983, Newark, New Jersey, USA
	Feu de nappe	Fuite Erreur humaine	Effet de domino Blessé et mort Pollution Effets toxiques Effets visuels Effets thermiques	1986, Thessalonique Grèce
	BOILOVER	L'existence de l'eau dans le bac Incendie prolongé Erreur humaine	Explosion Effet thermique Effet sonore Blessé et mort Pollution Effet de domino	2004, Skikda, Algérie

Explosion	BLEVE	Feu à proximité de bac Dommages ou fatigues mécaniques Corrosion Erreur humaine	Effet toxique Effet thermique Effet surpression Blessé et mort Effet de domino	1966, feyzin (Rhône) France
	La pressurisation	Surpression Erreur humaine	Effet thermique Effet toxique Effet surpression Blessé+ mort	2019, CIS hassi messaoud, Algérie
	Explosions de nuage inflammable	Rejet des gaz et des vapeurs Étincèle autour de la zone Non-respect de norme au travail Corrosion Fissure Erreur humaine	Effet thermique Effet surpression Effet toxique Effet de domino Blessé et mort	1988 mer du nord - piper- (Royaume-Uni)
	ROLLOVER	Vaporisation rapide de GNL Erreur humaine	Transfert de chaleur Déformation du bac Génère autre phénomène	1971, La Spezia, Italie

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les bases et les fondements de la sécurité. Pour ensuite passer au management des risques, en expliquant toutes ses étapes, et nous sommes consacrés à l'analyse et à la réduction des risques avec une explication détaillée. La clarification de ces concepts est nécessaire pour la suite de notre thèse.

Dans une seconde partie de ce chapitre, nous avons présenté les risques liés au stockage des hydrocarbures, leurs causes et conséquences, terminés par quelques exemples (algériens et internationaux) de l'ampleur de ces risques.

Chapitre 3

Etude et analyse des barrières de sécurité

Chapitre 3. Etude et analyse des barrières de sécurité

3.1. Introduction

La barrière de sécurité d'une manière générale, a pour but de protéger l'être humain, l'environnement et les biens. Mais il y a beaucoup d'opinions et des théories concernant les barrières de sécurité, et parmi ces théories la plus célèbre est la (Swiss Cheese) de (James Reason, 2000) comme le montre la figure 3.1, cette théorie a connu beaucoup d'amélioration et des versions (Perneger, 2005; J Reason et al., 2006).

Généralement, pour distinguer les termes liés aux barrières de sécurité, on doit seulement appliquer la théorie du «pourquoi», du «quoi» et du «comment». Où le «pourquoi» correspond à l'objectif de la barrière, le «quoi» à la fonction de barrière et le «comment» au système de barrière (Hollnagel, 2016).

Dans ce chapitre nous allons présenter les définitions des termes qui ont une relation avec les barrières de sécurité et les classifications proposées. Ainsi nous allons présenter les barrières de sécurité des bacs de stockage des hydrocarbures. L'objectif de ce chapitre est une préface pour entrer dans la problématique fondamentale de notre sujet.

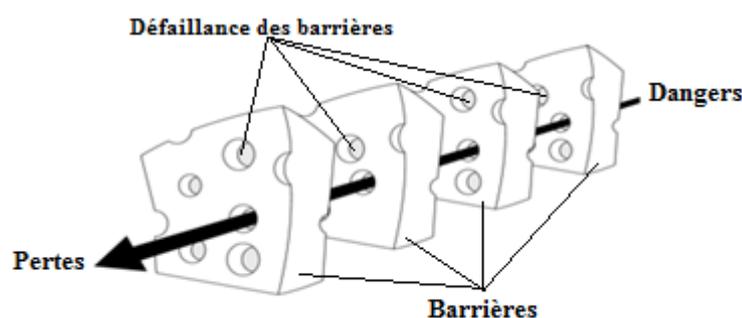


Figure 3.1: Modèle de Swiss Cheese version 2000 (James Reason, 2000)

3.2. Concepts et définitions

3.2.1.1. Barrière

Il n'y a pas de définition standard de la barrière de sécurité, donc ce terme a connu de nombreuses interventions et opinions (Hammouya & Chaib, 2020; Kang et al., 2016; Sobral & Guedes Soares, 2019).

Selon la norme NS-EN ISO 13702 (ISO:13702, 1999) la définition d'une barrière est « *Éléments techniques, opérationnels et organisationnels qui visent individuellement ou collectivement à réduire la possibilité / qu'une erreur, un danger ou un accident spécifique se produise, ou qui limitent ses dommages / inconvénients* ». Du point de vue de Sklet (Sklet, 2005), la définition était la suivante: « *Les barrières de sécurité sont des moyens physiques et/ou non physiques prévus pour prévenir, contrôler ou atténuer les événements ou accidents indésirables* ». Cependant, Nijs Jan Duijm (Duijm, 2009) la définit comme suit « *Une barrière de sécurité est une série d'éléments qui mettent en œuvre une fonction de barrière, chaque élément consistant en un système technique ou une action humaine* ».

D'après ces définitions, on distingue que **La barrière de sécurité** est un élément (technique, organisationnel et/ou humain) mis en place dans un système ayant pour objectif d'éliminer ou réduire les conséquences des risques de ce système.

3.2.2. Fonction de barrière

La plantation d'une barrière est pour objectif de réaliser une fonction souhaitée et prédéfinie, cette fonction selon la norme NS-EN ISO 13702 (ISO:13702, 1999) est « *La tâche ou le rôle d'une barrière. Les exemples incluent la prévention des fuites ou de l'inflammation, la réduction des charges d'incendie, la garantie d'une évacuation acceptable et la prévention des dommages auditifs* ».

Du point de vue de Sklet (Sklet, 2005), la fonction de barrière est: « *une fonction prévue pour prévenir, contrôler ou atténuer les événements ou accidents indésirables* ». Cette définition n'est pas loin de Nijs Jan Duijm (Duijm, 2009), où il est la défini comme suit: « *Une fonction de barrière est une fonction prévue pour empêcher, contrôler ou atténuer la propagation d'une condition ou d'un événement dans une condition ou un événement indésirable* ».

Cela veut dire que la fonction de barrière est une fonction dédiée à la prévention et à la protection d'un système contre un événement indésirable, à la surveillance des parties de ce système et à l'organisation des travaux qui y sont liés.

3.2.3. Système de barrière

Comme nous avons vu dans le 2^{ème} chapitre, le système est un ensemble d'élément réuni pour réaliser un objectif bien défini, pour cela le système de barrière est selon Sklet (Sklet, 2005) : « *Un système de barrière est un système qui a été*

conçu et mis en œuvre pour exécuter une ou plusieurs fonctions de barrière ». Cependant, Hollnagel (Hollnagel, 1999) voit que « *le système de barrière peut être défini comme le substrat ou la fondation de la fonction de barrière ».*

Alors, le système de barrière comprend une description de la réalisation de la fonction de barrière. Le système de barrière peut être constitué d'un ensemble d'éléments et/ou des systèmes. Il peut s'agir des composants physiques et techniques (matériel et logiciel), d'activités opérationnelles humaines ou d'une combinaison de ceux-ci.

3.3. Classification liée aux barrières de sécurité

Les barrières de sécurité sont classées selon plusieurs critères, ces critères peuvent être : l'origine de la barrière, la destination de la barrière, l'emplacement de la barrière, les systèmes de barrière et en fin les fonctions de barrière (Hollnagel, 2016). Dans ce travail on s'intéresse aux deux dernières classifications, à savoir :

- La fonction des barrières, et
- Le système des barrières.

3.3.1. Classification des barrières selon la fonction

D'une manière générale, les barrières de sécurité n'ont pas les mêmes fonctions, aussi la fonction de barrière peut être changée, en changeant sa position dans le système. Les fonctions les plus importantes peuvent être répertoriées comme suit (figure 3.2) :

- **Organisationnelle** : L'organisation est un point de départ extrêmement important pour n'importe quel travail ;
- **Prévention** : elles ont pour but d'éviter le maximum des risques probables et qu'en termes de « prévention vaut mieux que guérir » ; les barrières de ces fonctions réagissent avant l'accident ou l'événement redouté ;
- **Surveillance** : elle assure le bon fonctionnement des parties du système ; cela peut être humain ou technique ;
- **Protection** : Cette fonction se déclenche immédiatement après un accident.

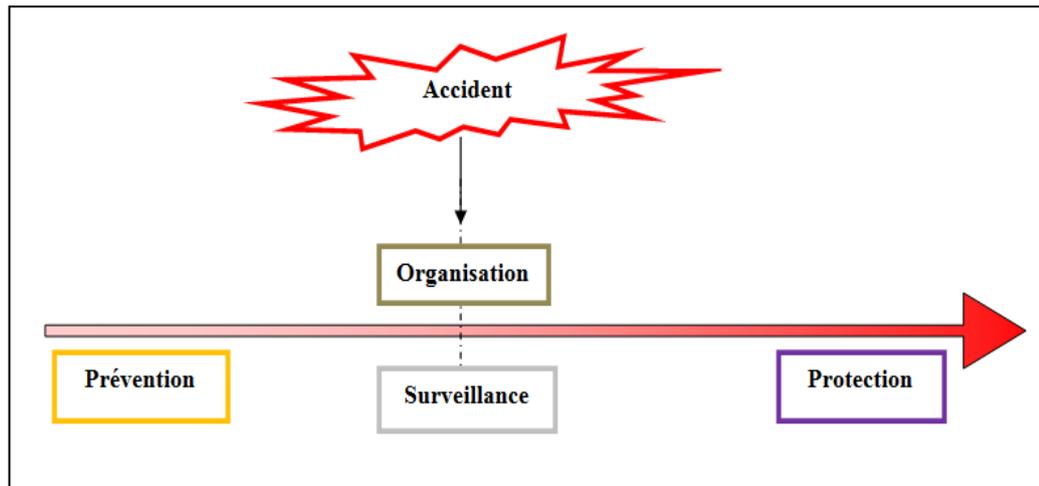


Figure 3.2 : Les fonctions des barrières de sécurité

Comme d'habitude, dans la littérature il existe plusieurs points de vue concernant le classement des fonctions. En 1993 James Reason (James Reason, 1993) le fondateur de la théorie de (SWEES CHEESE) a présenté une longue liste dans laquelle il classe les différentes fonctions des barrières de sécurité, qui était la suivante:

- Protection ;
- Détection ;
- Avertissement ;
- Récupération ;
- Confinement ;
- Échappement.

En 1999, Hollnagel (Hollnagel, 1999) a réduit la liste pour n'inclure que deux catégories principales;

- Prévention ;
- Protection.

Les fonctions de la barrière peuvent être classées en trois grandes catégories selon les normes (IEC:61508, 1998; IEC:61511, 2002; ISO:13702, 1999):

- Prévention ;
- Contrôle ;
- Réduction.

Mais d'après le projet-ARAMIS (De Dianous & Fiévez, 2006; Delvosalle et al., 2006), la classification des fonctions des barrières de sécurité comptons quatre catégories à savoir:

- Évitement ;
- Prévention ;
- Protection ;
- Contrôle.

En 2008, Hollnagel a expliqué que la même fonction peut être accomplie de différentes manières (Hollnagel, 2008), et il a déterminé ces types de réponses aux accidents comme suit :

- Élimination ;
- Remplacement ;
- Surveillance ;
- Protection ;
- Facilitation.

On remarque qu'il y a des fonctions communes entre les fonctions proposées. Les plus fréquentes sont : prévention, protection et surveillance/ contrôle.

3.3.2. Classification des systèmes de barrières

En ce qui concerne la classification des systèmes des barrières, il n'y est de consensus personne n'a été convenu. Ainsi, une barrière de sécurité peut être un élément physique ou une combinaison d'éléments, d'activités humaines ou de procédures administratives (De Dianous & Fiévez, 2006). En 1980 W.JOHNSON a suggéré que la classification des barrières soit physique ou non physique (Johnson, 1980), tandis que Kecklund *et al.* ont proposé que la classification soit technique, organisationnelle et humaine (Kecklund et al., 1996).

D'autres classifications a été retenu dans la littérature (Sklet, 2006; Sobral & Guedes Soares, 2019), le tableau suivant (tableau 3.1) résume les stations les plus importantes enregistrées par cette classification.

Tableau 3.1: Différentes classifications du système de barrières

Barrière matérielle		Barrière non- matériel		Références	Année
physique		Non-physique		(Johnson, 1980)	1980
physique	technique	facteur humain /organisationnel		(Svenson, 1991)	1991
technique		Humain /organisationnel	Humain	(Kecklund et al., 1996)	1996
Défense dure		Défense souple		(James Reason, 2016)	1997
physique	technique	administrative		(Wahlstrom & Gunsell, 1998)	1998
technique		organisationnel	opérationnel	(Bento, 2003)	2003
Matériel		comportemental		(Hale, 2003)	2003
Passive	active	symbolique	Action humaine	(De Dianous & Fiévez, 2006)	2006
physique	fonctionnel	symbolique	incorporelle	(Hollnagel, 2008)	2008
technologique		Organisation	Personnel	(Kang et al., 2016)	2016
Matériel		Humain /organisationnel		(Grattan, 2018)	2018

Le système de barrière de sécurité peut être classé aussi comme (barrière technique, barrière humaine et barrière organisationnelle) selon la figure 3.3.

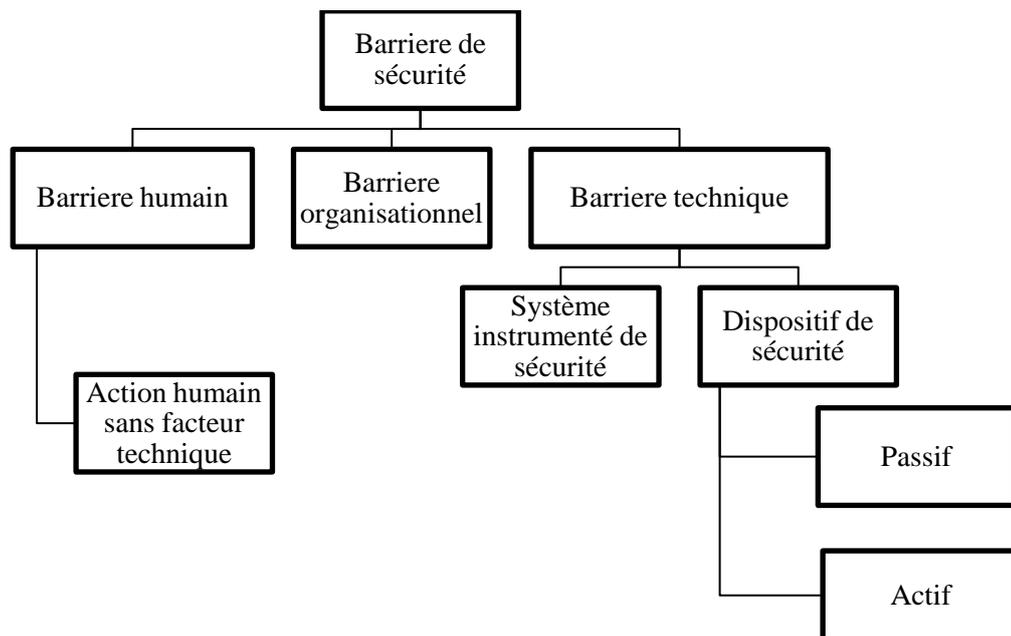


Figure 3.3: Les types des barrières de sécurité

3.3.2.1. Barrière Humaine de Sécurité (BHS)

Dianous et Fiévez ont considéré ce type des barrières comme “action humaine” (De Dianous & Fiévez, 2006) et caractérisent cette barrière comme « *L'efficacité de ces barrières repose sur les connaissances de l'opérateur pour*

atteindre le but. Les actions humaines sont à interpréter largement, y compris les observations par tous les sens, la communication, la pensée, l'activité physique, mais aussi les règles, les directives, les principes de sécurité... Les actions humaines peuvent faire partie d'une séquence détection - diagnostic – action ». Les barrières humaines est défini selon Bourareche et al. comme : « Elles sont constituées d'activités et procédures humaines ne faisant pas intervenir de barrières techniques de sécurité pour s'opposer au déroulement d'un accident » (Bourareche et al., 2011). D'après Lauridsen et al., elles sont: « les actions et activités que le personnel doit effectuer pour faire partie de la réalisation d'une fonction de barrière » (Lauridsen et al., 2016) .

Donc la barrière humaine de sécurité (dite aussi non-technique ou non-physique) est toutes les activités humaines, sans assistance technique, qui visent à prévenir, protéger ou contrôler un risque.

3.3.2.2. Barrière organisationnelle

Les barrières organisationnelles ont été considéré comme barrières symboliques par De Dianous et Fiévez, qui les ont défini comme : « Ces barrières nécessitent une interprétation par une personne pour atteindre leur objectif. L'exemple typique peut être des avertissements passifs (comme se tenir à l'écart des zones interdites, ouvrir des tuyaux étiquetés, s'abstenir de fumer ...) » (De Dianous & Fiévez, 2006). Cependant, Bourareche et al. (Bourareche et al., 2011) trouvent que « Ce sont des barrières mixtes à composantes techniques et humaines: l'opérateur est en interaction avec les éléments techniques du système de sécurité qu'il surveille ou sur lesquels il agit ». D'après (Lauridsen et al., 2016), la définition de ces barrières est: « Les éléments de barrière organisationnelle désignent le personnel avec des rôles ou des fonctions définies et des compétences spécifiques qui font partie de la réalisation d'une fonction de barrière ».

Nous résultons que les barrières organisationnelles sont des barrières qui combinent des barrières technique et humaine, tandis que ces éléments se complètent pour maîtriser les risques redoutés.

3.3.2.3. Barrière technique de sécurité (BTS)

Les barrières techniques sont définies comme suit : « Les éléments de barrière techniques désignent les équipements et systèmes qui font partie de la réalisation

d'une fonction de barrière» (Lauridsen et al., 2016). Donc, les barrières techniques sont l'ensemble d'éléments techniques nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité. On les appelle aussi des Mesures de Maîtrise des Risques (MMR).

- **Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS)**

Un SIS est aussi appelé boucle de sécurité. C'est un ensemble d'éléments (matériel et logiciel) assurant la mise en état de sécurité des procédés lorsque des conditions prédéterminées sont atteintes. La figure 3.4 présente un exemple de SIS.

Cependant la norme CEI 61511 (IEC:61511, 2002) définit les systèmes instrumentés de sécurité comme « *système instrumenté utilisé pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité. Un SIS se compose de n'importe quelle combinaison de capteur(s), d'unité loriquet(s) et d'élément(s) terminal (aux)* ».

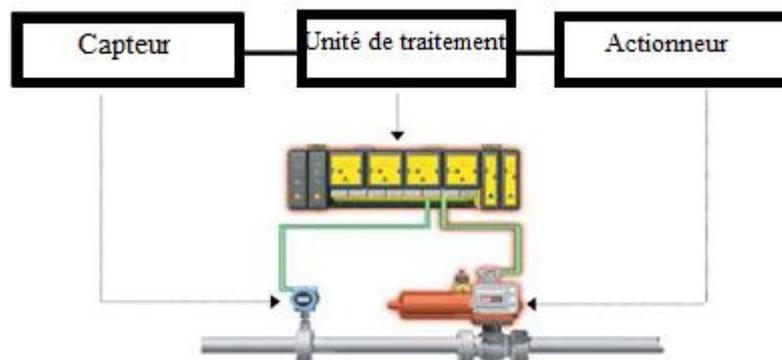


Figure 3.4 : Exemple d'un SIS (détecteur)

- **Dispositifs de sécurité**

Un dispositif de sécurité est en général un élément unitaire, autonome, ayant pour objectif de remplir une fonction de sécurité, dans sa globalité. On distingue deux catégories de dispositif, à savoir :

- **Les barrières statiques ou passives,**

La première catégorie du dispositif de sécurité est la barrière passive, où De Dianous et Fiévez la définirent par « *Des barrières toujours en fonction (permanentes), pas besoin d'actions humaines, de sources d'énergie ou de sources d'information. Les barrières passives peuvent être des barrières physiques (digue de rétention, mur, ...), des barrières permanentes (systèmes de prévention de la*

corrosion) ou une conception intrinsèquement sûre » (De Dianous & Fiévez, 2006). Selon Bourareche et al. ce type des barrières c'est « qui ne met en jeu aucun système mécanique (ressort, levier...) pour remplir sa fonction de sécurité et qui ne nécessite ni action humaine (hors intervention de type maintenance), ni action d'une mesure technique, ni source d'énergie externe pour remplir sa fonction. Dans cette catégorie on trouve l'écran de protection mécanique ou thermique, disque de rupture, toit flottant de bacs, murs de confinement et cuvette de rétention » (Bourareche et al., 2011).

Ce type de barrière défend en permanence et à long terme le système face à ses agresseurs sans aucune action humaine ou technique. Parmi ces barrières on trouve par exemple: les murs antisismiques d'une centrale nucléaire ou une cuvette de rétention des bacs de stockage.

- **Les barrières dynamiques ou actives**

Le deuxième dispositif est la barrière dynamique, où De Dianous et Fiévez voient que « *Ces barrières créent des conditions préalables à remplir avant que l'action puisse être menée. Ainsi, ces barrières doivent être automatisées ou activées manuellement pour fonctionner ou ces barrières peuvent être des barrières mécaniques qui nécessitent une activation (hardware) pour remplir leur fonction. Les barrières activées nécessitent toujours une séquence de détection - diagnostic - action. Cette séquence peut être réalisée à l'aide d'actions matérielles, logicielles et/ou humaines* » (De Dianous & Fiévez, 2006). Selon Bourareche et al. ces dispositifs fonctionnent comme suit : « *qui met en jeu un système mécanique (ressort, levier...) pour remplir sa fonction. Il peut nécessiter une source d'énergie externe pour fonctionner. Dans cette catégorie, citons les soupapes de sécurité, clapets limiteurs de débit, événements de respiration de bacs avec ressorts, clapet anti-retour* » (Bourareche et al., 2011).

Ce type de barrières est des barrières qui ne sont activées qu'une fois l'événement redouté ou le danger détecté. Parmi ces barrières on trouve par exemple: coup feu, sprinkler, désenfumage ...etc.

3.4. Les critères de performance des barrières de sécurité

L'objectif d'analyse de la performance d'une barrière est de déterminer l'étendue de la réalisation de la fonction qui lui est attribué, pour cela il existe des

critères appelés les critères de performance. Dans ce contexte il existe plusieurs contributions, dont les plus reconnus sont résumées ci-dessous.

L'évaluation des performances des barrières de sécurité utilise deux paramètres selon Landucci et *al.* (Landucci et al., 2015), à savoir :

- La disponibilité ;
- Efficacité.

Selon le projet ARAMIS (Andersen et al., 2004), L'évaluation de la performance des barrières consiste en :

- L'évaluation de leur efficacité ;
- De leur temps de réponse ;
- De leur niveau de confiance.

Selon Rollenhagen (Rollenhagen, 2003) la liste de paramètres de performance, des barrières comprenaient quatre (04) paramètres. Ces paramètres sont :

- La validité ;
- La fiabilité ;
- L'exhaustivité et
- La maintenabilité.

D'autres contributions sont mentionnées dans la littérature dont les plus importantes sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3.2: Les paramètres de performance des barrières de sécurité

Paramètres de performance		Reference
Disponibilité	Efficacité	(Landucci et al., 2015)
Efficacité	Temps de réponse	(Andersen et al., 2004)
Fonctionnalité / efficacité	Disponibilité / fiabilité	(PSA/RNNS, 2002)
Validité	Fiabilité	(Rollenhagen, 2003)
	Exhaustivité	Maintenabilité
Adéquation	Disponibilité, / fiabilité	(Hollnagel, 2004)
Fonctionnalité / efficacité	Fiabilité / disponibilité	(Sklet, 2006)
Capacité	Fiabilité	
Capacité	Disponibilité	Événement / conditions de déclenchement
	Fiabilité	
Efficacité	Adéquation	(PSA, 2002)
Efficacité	Adéquation	(Neogy et al., 1996)
	Adéquation	
Efficacité	Adéquation	(Hollnagel, 1995)
	Adéquation	

Nous remarquons que les paramètres du projet ARAMIS sont presque communs à toutes les autres contributions, par conséquent, nous recommandons cette classification pour trouver que:

3.4.1. Efficacité

L'efficacité selon Sklet (Sklet, 2006) est « *La fonctionnalité / efficacité de la barrière est la capacité à effectuer un fonctionnement dans des conditions techniques, environnementales et opérationnelles données* ». D'après De Dianous et Fiévez « *L'efficacité est la capacité d'une barrière de sécurité technique à remplir une fonction de sécurité pendant la durée, dans un mode non dégradé et dans des conditions spécifiées. L'efficacité est soit un pourcentage, soit une probabilité de performance de la fonction de sécurité définie* » (De Dianous & Fiévez, 2006).

L'efficacité d'une barrière de sécurité est l'aptitude de cette barrière à remplir sa fonction de sécurité, dans son contexte d'utilisation et pendant une durée donnée de fonctionnement. Elle s'exprime en pourcentage (%), d'effectuer une fonction requise.

3.4.2. Temps de réponse

Le temps de réponse selon Sklet est défini comme suit : « *Le temps de réponse d'une barrière de sécurité est le temps écoulé entre une déviation qui aurait dû activer une barrière de sécurité et l'accomplissement de la fonction de barrière spécifiée* » (Sklet, 2006). Cependant De Dianous et Fiévez ont vu que : « Le temps de réponse est la durée entre la mise en tension de la barrière de sécurité et la réalisation complète (qui est égale à l'efficacité) de la fonction de sécurité assurée par la barrière de sécurité » (De Dianous & Fiévez, 2006).

Donc, un temps de réponse d'une barrière est l'Intervalle de temps pour amène à effectuer sa première réponse pour réaliser la fonction requise. Par exemple le temps de réponse d'un détecteur est le temps d'être capté traiter et en fin alarmer comme fonction souhaitée.

3.4.3. Niveau de confiance (NC)

De Dianous et Fiévez inspirent une définition pour le niveau de confiance des barrières de la norme IEC 61511, qui est « *Le niveau de confiance des barrières est lié à sa fiabilité. Le niveau de confiance d'une barrière de sécurité est inversement proportionnel à la probabilité de défaillance à la demande de la barrière. Il*

correspond à la fiabilité de la barrière pour exécuter correctement une fonction de sécurité requise selon une efficacité et un temps de réponse donné dans toutes les conditions énoncées dans un laps de temps déterminé » (De Dianous & Fiévez, 2006).

Ce que l'on entend par niveau de confiance pour une barrière de sécurité, c'est sa crédibilité, sa fiabilité et son efficacité à terminer sa fonction à un moment précis, ce qui signifie qu'il peut ne pas effectuer cette fonction requise.

3.5. Les barrières de sécurité au niveau des bacs de stockage

Comme nous avons mentionné dans chapitre 1, il existe plusieurs types des bacs de stockage des hydrocarbures, pour cela nous avons choisi que 03 types des bacs pour cette partie d'étude : bac cylindrique à toit fixe, bac cylindrique à toit flottant et sphère. Ces trois réservoirs sont examinés à ce stade en termes de barrières techniques.

Nous pouvons deviser les barrières technique de sécurité des bacs de stockage selon ses fonctions comme suit :

- **Barrières de préventions**

Parmi les barrières techniques de prévention des bacs des stockages, nous trouvons :

- Les événements ;
- Les soupapes.

- **Barrières de surveillances**

Pour contrôler et surveiller un bac de stockage, il doit contenir les barrières de fonction de contrôle ou surveillance comme suit :

- Trou d'homme ;
- Le manomètre ;
- L'indicateur de niveau ;
- Le dispositif de purge ;
- Le dispositif de prise d'échantillon ;
- Tube de sonde de température.

- **Barrières de protections**

Les barrières de protection réagissent après le risque pour réduire la gravité, parmi ces barrières il existe :

- La cuvette de rétention ;
- Le réseau d'incendie ;
- Les dispositifs d'alarme ;
- Les vannes.

Comme on peut classer ces barrières selon ses natures (active ou passive), les barrières techniques qui assurent la sécurité ces bacs de stockage sont regroupés dans le tableau suivant (Tableau 3.3):

Tableau 3.3: Différentes barrières de sécurité des bacs de stockage

	Barrière	Toit fixe	Toit flottant	Sphères
Active	Système de détection gaz	+		+
	Système de détection fumée	+		+
	Système de détection flamme	+		+
	Système de détection de vapeur	+	+	
	Système de détection des hydrocarbures	+	+	
	Réseau d'eau incendie	+	+	+
	Système fixe mousse	+	+	
	Système d'avertissement composé de boîtes d'alarme et de sirènes existantes	+	+	+
	Système de vidange	+	+	+
	Des caméras de télésurveillance.	+	+	+
	Vannes sécurité positive	+	+	+
	Joint d'étanchéité		+	
	Indicateur de niveau		+	
	Les béquilles		+	
Passive	Cuvette de rétention (dispositif)	+	+	
	Clapets anti-feu commandé	+		
	Clapet de sortie	+	+	+
	Écran flottant		+	
	Couronne de refroidissement	+	+	+
	Soupape	+	+	+
	Trou d'homme	+	+	
	Mise à la terre	+	+	+
	Jauge	+	+	+
	Dispositif de décompression	+	+	+
	Tube de sonde de température	+	+	
	Event	+	+	+

D'après l'observation de tableau 3.3, nous avons remarqué qu'il y a des barrières communes entre les différents bacs de stockage des hydrocarbures et des barrières non communes. Cela explique la différence dans l'utilisation des bacs de stockage des différents produits.

3.6. Cuvette de rétention

3.6.1. Définition

Parmi les barrières de sécurité, il y a la cuvette de rétention qui est notre intérêt d'étude, où elle défini par Arrêté français du **9 Novembre 72** relatif à l'aménagement et l'exploitation de dépôts d'hydrocarbures liquéfiés, **article 114**(Arrêté du 09 /11/72, 1972) comme suit : « *Une cuvette de rétention est une capacité destinée à recevoir les hydrocarbures s'écoulant accidentellement des réservoirs* ». Et selon la norme mexicaine (NRF-015-PEMEX-2008, 2008) est « *Mur de soutènement en béton armé, construit autour d'un ou plusieurs réservoirs de stockage, pour contenir un déversement de produit* ». Elle peut être aussi : « *Une installation de rétention (y compris les murs et la base) construite autour d'une zone où des substances potentiellement polluantes sont manipulées, traitées ou stockées, dans le but de contenir toute fuite involontaire de matières de cette zone jusqu'à ce que des mesures correctives puissent être prises* » (Environmental Protection Agency, 2004).

Donc la cuvette de rétention est une barrière technique et passive de protection des bacs de stockage des liquides versés éventuellement où elle l'empêche de s'infiltrer dans le sol ou de s'écouler.

Les fonctions de cette barrière sont de :

- Réduire la surface de contact entre le matériau inflammable et l'air ;
- Contenir les produits qui peuvent accidentellement s'y verser, et donc de réduire les conséquences d'une éventuelle pollution ;
- Réduire les énormes scénarios d'accidents ;
- Récupère et protéger le produit déversé.

La cuvette de rétention est toujours connectée à d'autres barrières de sécurité telles que : défèrent type de détecteur, diffuseur de la mousse, des vannes,...etc.

3.6.2. Type des cuvettes de rétention

Selon la littérature il existe plusieurs formes de la cuvette de rétention comme indiqué dans la figure 3.5 (Arrêté du 09 /11/72, 1972; Environmental Protection Agency, 2004; Kaźmierczak, 2015; Patricia et al., 2010).

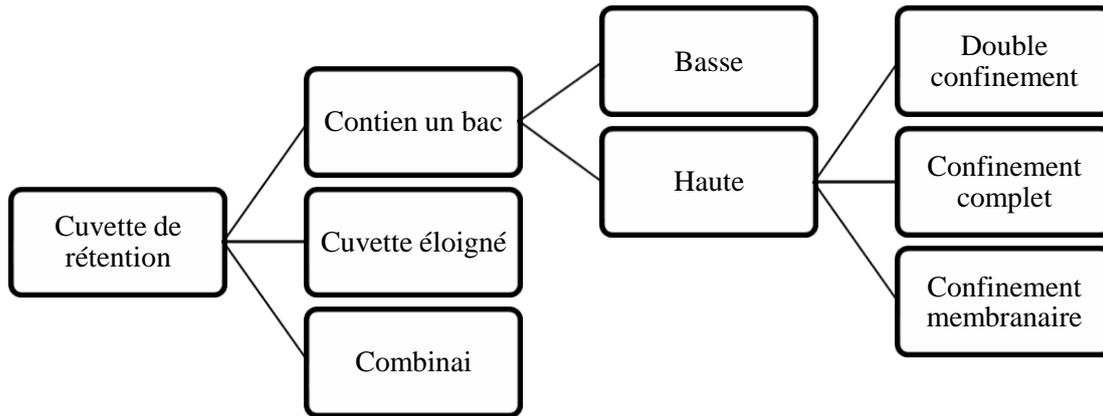


Figure 3.5 : Les types des cuvettes

3.6.2.1. Les cuvettes qui contiennent un bac

Les cuvettes de ce modèle sont un deuxième conteneur autour du réservoir de stockage, conçu pour empêcher la propagation de tout produit qui pourrait s'échapper où ils contiennent le produit à la source. Les réservoirs de stockage peuvent être regroupés individuellement ou en groupes. Bien que la disposition des installations dicte généralement que les cuvettes soient construites à l'extérieur du bac (le cas des cuvettes basses), elles peuvent également être construites à l'intérieur (cas des bacs cryogène).

2.6.2.1.1. Cuvette basse

Ce type de barrière peut contenir plus d'un réservoir où il est entouré d'une paroi ou d'un barrage extérieurs, assurant un confinement secondaire en cas de défaillance du réservoir de stockage, bien que la vapeur ne soit pas contenue, en cas d'inflammation, de graves dommages aux équipements, structures et environnants à cause de feu de nappe en plus de l'effet de domino peut se développer (Figure 3.6). L'un de ses problèmes c'est la perte d'étanchéité, elle doit donc être surveillée périodiquement.

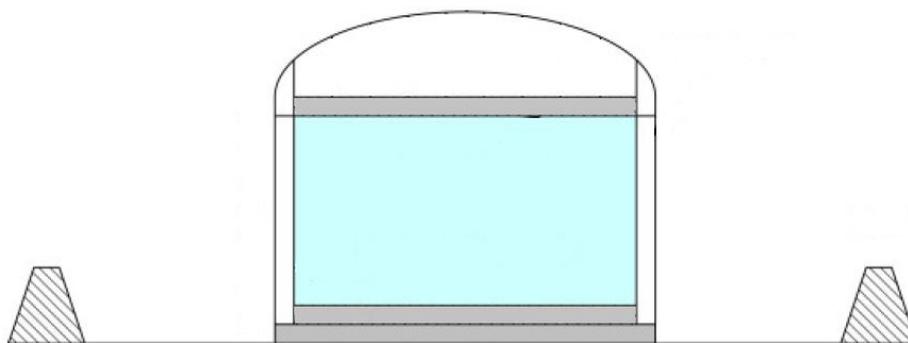


Figure 3.6 : schématisation d'une cuvette basse

2.6.2.1.2. Cuvette haute

- Double confinement

Ce type de la cuvette haute est similaire à la cuvette basse avec l'ajout de murs construits comme confinement secondaire plutôt que comme barrage de confinement (Figure 3.7). Par conséquent, en cas de défaillance du bac de stockage, le réservoir secondaire est conçu pour contenir le liquide. La paroi extérieure limite également la dispersion de la vapeur de produit stocké. Un mur extérieur en béton augmente le coût du réservoir, mais dans le cas où l'espace est réduit, son utilisation est bénéfique.

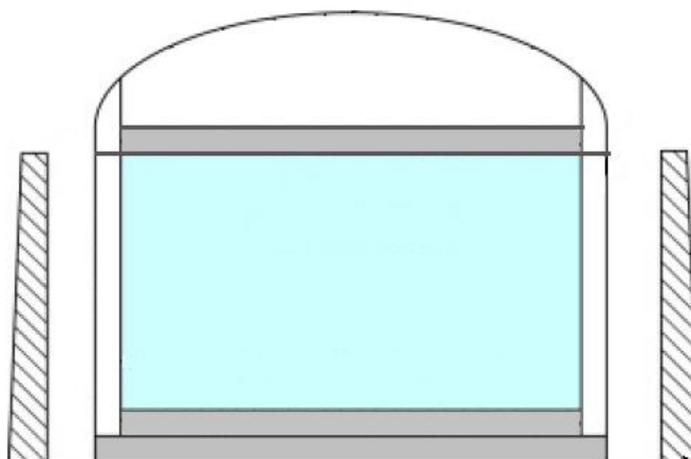


Figure 3.7: schématisation cuvette haute modèle double confinement

- Confinement complet

Il existe un cas particulier de la cuvette haute dans lequel l'espace annulaire entre le réservoir et la barrière est scellé. Dans ce cas, les bacs de stockage deviennent appelés réservoirs de confinement complets et sont généralement utilisés pour stocker du GNL (Figure 3.8).

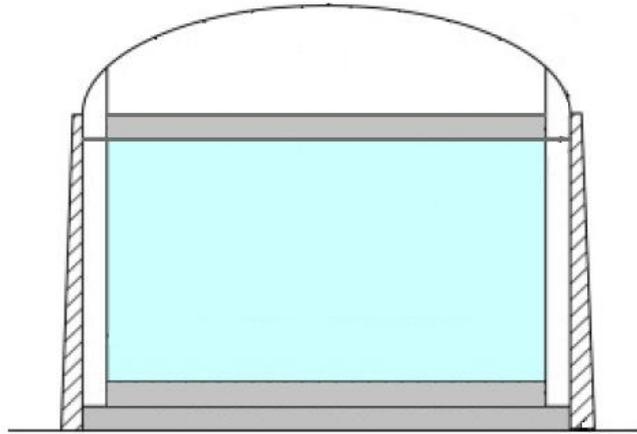


Figure 3.8: schématisation cuvette haute modèle confinement complet

- **Confinement membranaire**

Ce type de cuvette se distingue par le manque d'espace entre celui-ci et le réservoir, auquel cas la paroi du réservoir est adjacente au support, ce qui rend toute fuite de liquide ou de vapeur du réservoir principal directement emprisonné dans la cuvette et l'empêche de sortir (Figure 3.9).

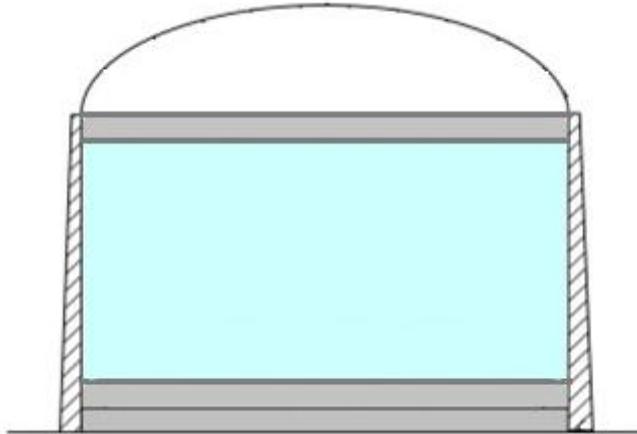


Figure 3.9: schématisation cuvette haute modèle confinement membranaire

3.6.2.2. Cuvette éloigné

Dans ce type de cuvettes (Figure 3.10), un système de confinement à distance est utilisé, et tout produit qui fuit du bac de stockage est intercepté en le dirigeant le long du sol en pente vers une installation de confinement secondaire qui peut être éloignée du site principal. Les problèmes de ce type de cuvette sont généralement : la capacité de confinement de cette forme est limitée par rapport à la première forme, en

plus de possibilité de contamination de produit par les résidus d'incendie, par l'eau d'extinction ou en cas de pluie et par la poussière. Ce qui la distingue, ce sont les méthodes de drainage et de transport, ainsi que l'évacuation du liquide des lieux de danger.

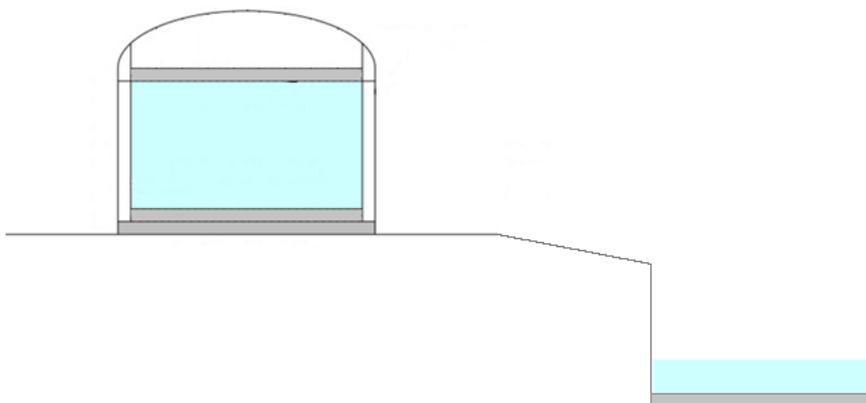


Figure 3.10: schématisation d'une cuvette éloigné

3.6.2.3. Cuvette combiné

Ce type dépend de la combinaison des caractéristiques des systèmes locaux et distants, peut être souterrains (Figure 3.11) ou hors sol (Figure 3.12), auquel cas, le processus de transport de liquide de fuite nécessite des pompes. Les cuvettes de ce type offre une double protection pour le liquide déversé.

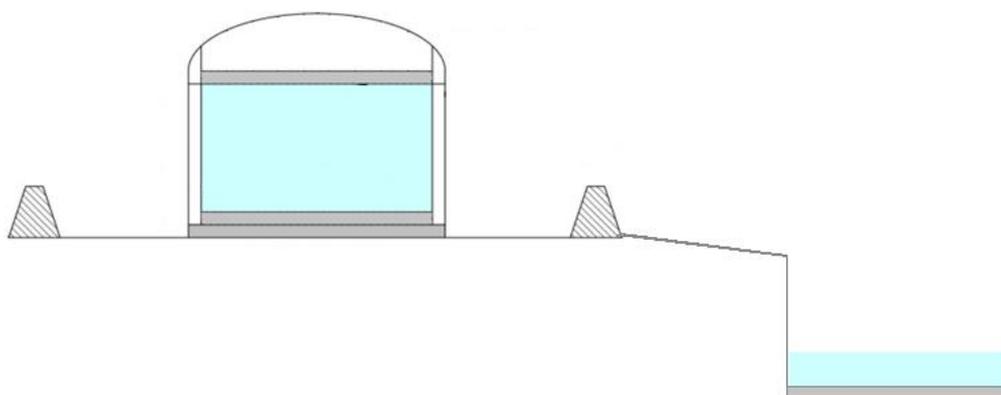


Figure 3.11: schématisation d'un modèle combiné avec cuvette éloigné libre

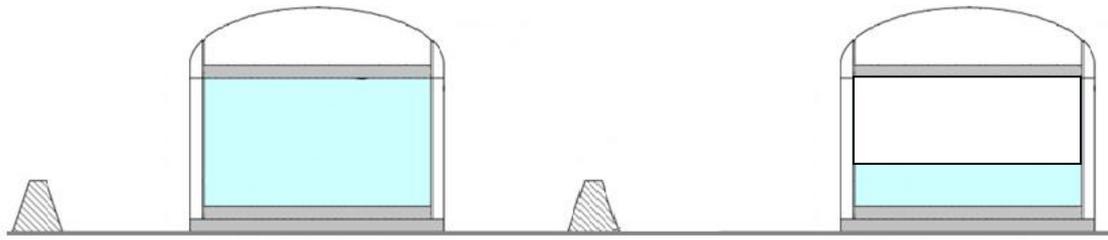


Figure 3.12: schématisation d'un modèle combiné avec cuvette éloigné alimenté par motopompe

3.7. Les types des bordures de la cuvette

Les bordures de cuvette sont de plusieurs types (Patricia et al., 2010) (Figure 3.13), notamment:

- Merlon argilo-sableux ;
- Mur en béton armé ;
- Mur en béton précontraint ;
- Les bordures combinèrent : merlon et mur ;

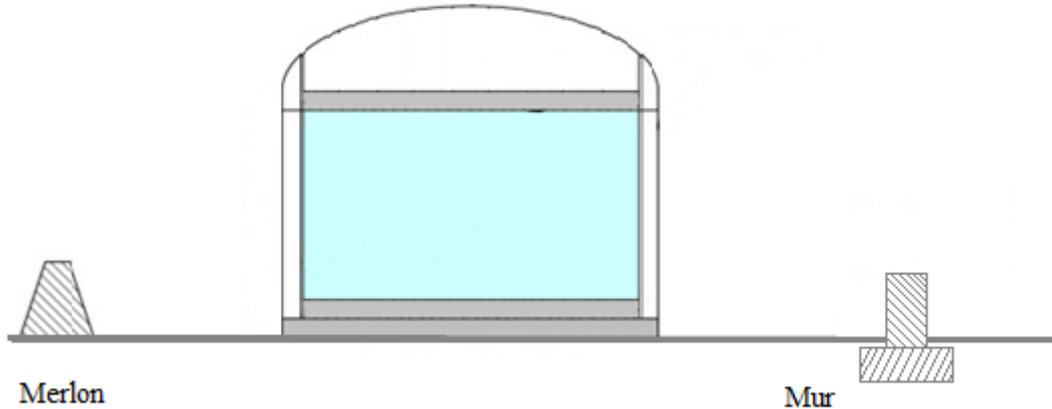


Figure 3.13: les types des bordures des cuvettes

3.8. Capacité de la cuvette

Chaque cuvette est caractérisée par sa capacité qui est « celle qui est calculée suivant ses dimensions géométriques, sans tenir compte de la présence des réservoirs implantés dans cette cuvette. La capacité utile d'une cuvette est réputée égale à sa capacité réelle, qu'elle contienne un ou plusieurs réservoirs » (Arrêté du 09 /11/72, 1972).

D'après (NRF-015-PEMEX-2008, 2008) « *La capacité volumétrique des cuvettes de rétention qui abritent un seul réservoir de stockage à l'intérieur doit être égale ou supérieure à la capacité nominale totale du réservoir. Pour les cuvettes de rétention qui abritent plusieurs réservoirs de stockage, la capacité volumétrique minimale doit être celle nécessaire pour contenir la capacité nominale totale du plus grand réservoir, plus le volume que les autres réservoirs occupent jusqu'à la hauteur du réservoir. Mur de soutènement, à l'intérieur de la cuvette, plus que le volume des autres constructions qui occupent un espace à l'intérieur de la digue de confinement* ».

Donc la capacité de cuvette de rétention est de 110% de volume du bac dans le cas de cuvette pour un seul bac (I. Sutton, 2015), dans le cas de plusieurs bacs de volumes différents, la capacité géométrique de la cuvette dépend au le plus grand bac et dans le cas de plusieurs bacs de même volume la capacité géométrique de la cuvette est 50 % de la capacité des réservoirs.

3.9. Conclusion

Ce chapitre a présenté les termes reliés aux barrières de sécurité, où nous avons remarqué qu'il n'y a pas une définition commune entre tous les chercheurs qui sont intéressés par ce côté scientifique. En plus, les barrières sont classées selon plusieurs critères selon le type, la fonction et le système. Pour déterminer la performance de ces différents barrières il suffit de déterminer ses efficacités, ses temps de réponse et ses niveaux de confiance.

D'une façon générale les barrières de sécurité sont omniprésentes dans le secteur industriel, en particulier le secteur de stockage des hydrocarbures et comme les bacs de stockage sont différents, automatiquement ses barrières aussi ne sont pas pareilles.

Dans notre thèse, nous nous intéressons à une barrière de sécurité passive, qui est la cuvette de rétention. Plusieurs modèles de cuvette existent ayant pour fonction d'accueillir le produit stocké en cas de déversement. Cependant, il faut signaler que la capacité de la cuvette dépend de la capacité des bacs à protéger.

Chapitre 4.

**Situation des barrières de sécurité
dans l'entreprise algérienne**

Chapitre 4.

Situation des barrières de sécurité dans l'entreprise algérienne

4.1. Introduction

L'Algérie occupe une place importante dans l'ensemble des pays producteurs des hydrocarbures. Toutefois ces dernières années, les établissements industriels ont connu une augmentation rapide du nombre d'accidents industriels majeurs où les incendies et les explosions occasionnant des impacts et des effets grave sur les personnes, les biens et l'environnement. Afin d'éviter de tels phénomènes dangereux ou encore le rejet des matières dangereuses, les industriels sont amenés à mettre en place des mesures de maîtrise des risques dont le rôle est de prévenir l'apparition de tels phénomènes ou d'en limiter ses conséquences. Ainsi et suite à la non-satisfaction des résultats obtenus en sécurité durant la période écoulée, la SONATRACH a essayé de renforcer les barrières de sécurité au niveau de ces sites industriels. C'est pourquoi, la question au quelle répond ce chapitre est comment aborder l'évaluation de ces barrières de sécurité et comment traduire cette sécurité en termes opératoires d'aide à la décision.

Ces barrières, comme mentionné dans le chapitre précédent, sont soit techniques, soit humaines ou organisationnelles, ces dernières sont présentées sous la forme de lois, de législations ou de procédures.

La nécessité de mener des analyses et des critiques périodiques de ce système est extrêmement important pour son amélioration et son développement durable. De ce fait, nous allons essayer d'analyser et de critiquer le système de sécurité des bacs de stockage pour le cas des entreprises algériennes.

Pour faciliter l'étude, nous avons divisé le système en deux parties. Dans la première partie, nous avons rassemblé les barrières techniques et humaines, car elles sont liées les unes aux autres et qu'il est difficile de les étudier séparément. La deuxième partie du système concerne les barrières organisationnelles (lois et législation algériennes).A la fin de ce chapitre, nous allons étudier la relation entre le développement des lois algériennes et les accidents survenus au niveau d'une raffinerie Algérienne.

4.2. Évaluation du système de sécurité (barrières techniques et humaine) :

Le système de sécurité de stockage des hydrocarbures est devenu un sujet très sérieux pour les chercheurs et même les pays producteurs ou consommateurs de ces produits. Cette importance découle du rôle essentiel de ce système dans les installations de stockage. De ce fait, l'amélioration et la modification sont très importantes pour la prévention des risques et la protection des installations. Pour mener à bien ces objectifs, on doit identifier tous ses composants, ses fonctions et les causes de défaillance de chaque élément.

Dans cette partie, nous allons discuter en détail le système de sécurité incendie au niveau des entreprises algériennes, par la mise en lumière de ses points faibles et leurs causes, tout en utilisant la combinaison entre deux méthodes d'analyse SADT et BORA.

4.2.1. Décomposition du système :

Pour identifier tous les éléments du système de sécurité des bacs de stockage utilisés dans entreprises algériennes, il faut les décomposer en sous-systèmes. Pour cela nous avons appliqué la méthode SADT. Sur la figure 4.1 nous allons présenter le système de sécurité global et son environnement dans le cas d'une augmentation de la température du produit stocké.

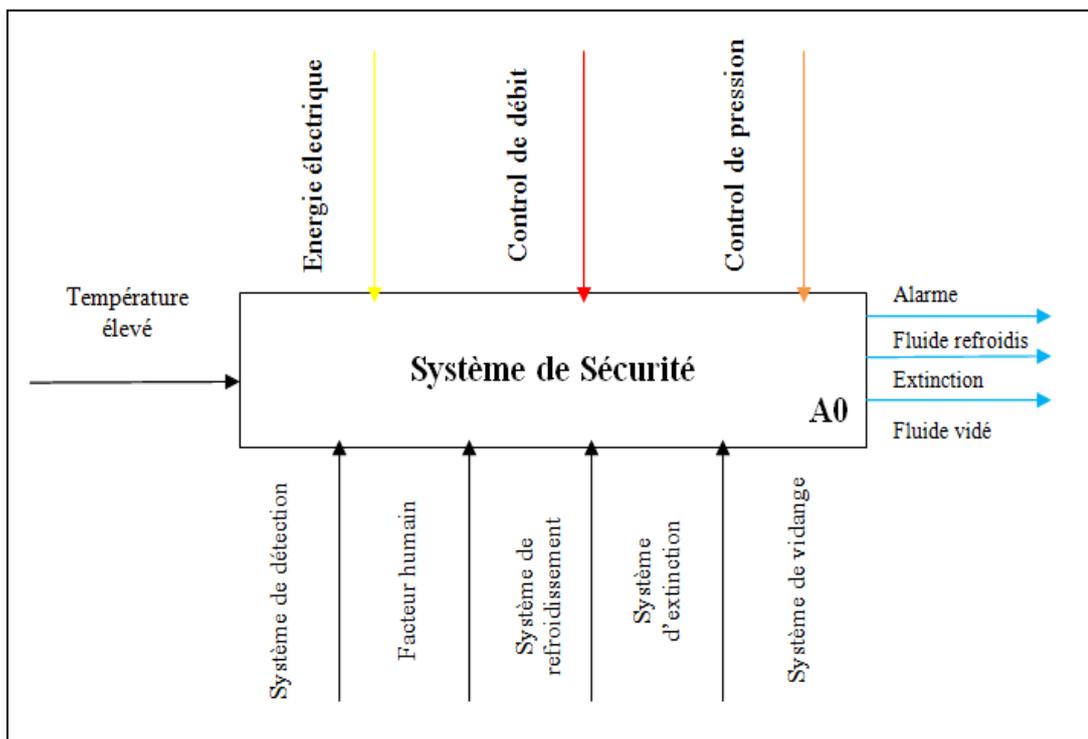


Figure 4.1 : Le système de sécurité par SADT

Après cette décomposition globale du système, nous avons réalisé une étude détaillée pour décortiquer en profondeur le système (voir figure 4.2).

La figure 4.2 montre les composant du système de sécurité A_0 , qui comporte cinq barrières principales numérotées de : A_1 jusqu'à A_5 , ainsi que l'environnement de chaque barrière et ces actions.

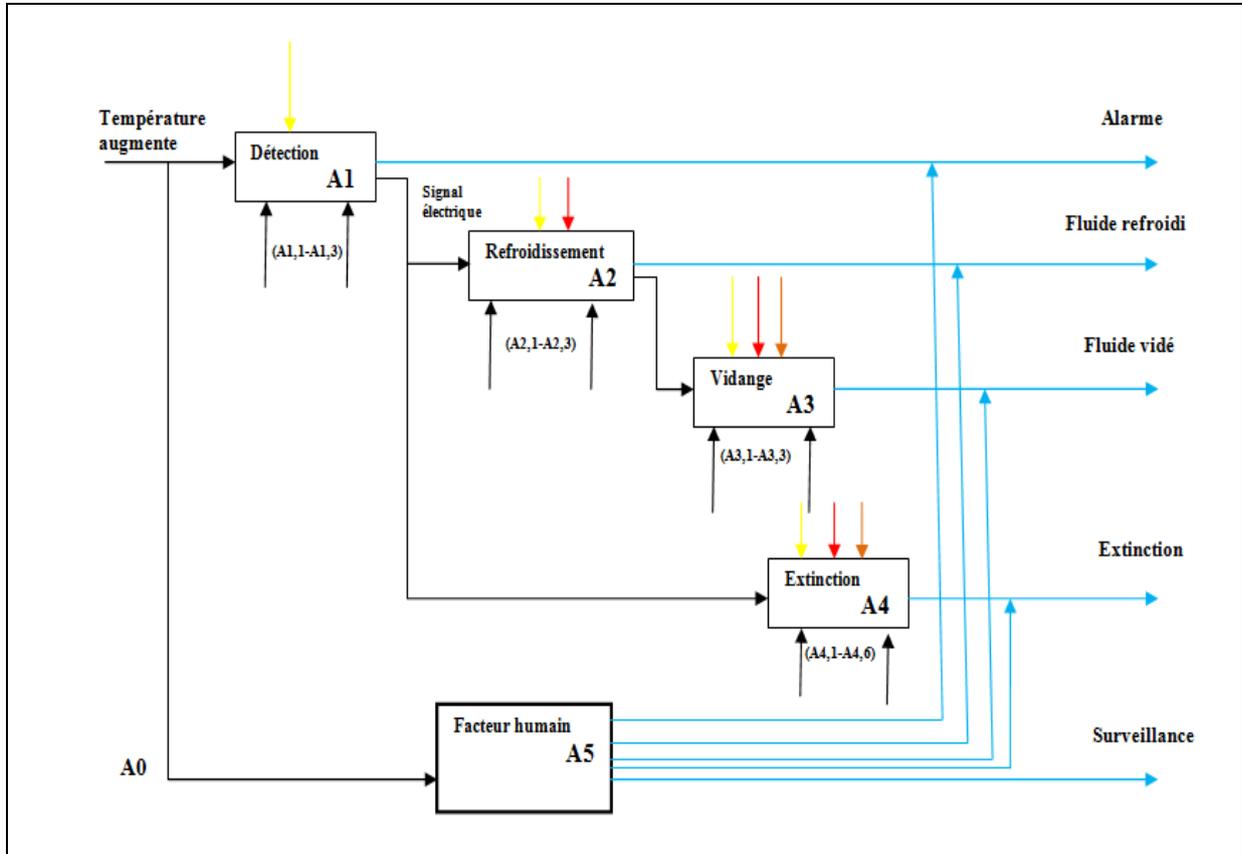


Figure 4.2 : Décomposition du système de sécurité par SADT

Légende :

→ Énergie électrique

→ Pression

→ Débit

A1,1: Détecteur

A1,2: Tableau de signalisation

A1,3: Câbles

A2,1: Réservoir de l'eau

A2,2: Couronne de refroidissement

A2,3: Motopompe

A3,1: Motopompe

A3,2: Vannes

A3,3 : Bac de réserve

A4,1: Unité de stockage et de dosage

A4,2: Réserve d'eau

A4,3: Proportion

A4,4: filtre d'Air

A4,5: Évacuateur de mousse

A4,6: Chambre de mousse

Selon de la figure 4.2, le système de sécurité des bacs des stockages le cas d'entreprises algériennes, nous considérons que l'augmentation de la température comme un événement initial (**données d'entrée**). Ainsi, les barrières de ce système sont :

4.2.1.1. Barrière de détection (A1)

Les barrières de détection sont extrêmement importantes dans les parcs des hydrocarbures. Il existe de nombreux modèles différents qui peuvent être utilisés pour protéger un réservoir d'hydrocarbures. Cela nécessite en fait plusieurs types de détecteurs pour garantir l'exhaustivité de tous les phénomènes qui accompagnent un incendie (tel que: gaz, fumée, température, lumière...), voire qui précèdent ou accompagnent le déclenchement d'un incendie pour éviter cela dans les plus brefs délais. Cela se fait par détection tout en alertant sous la forme d'une alarme sonore ou visuelle. Cela représente les données de sorties accompagner par un signal électrique qui déclenche la barrière suivante.

Le détecteur choisi dans cette étude est celui de température. On trouve comme **données de contrôle** l'énergie électrique, et **comme mécanisme** :

- Détecteur ;
- Câbles ;
- Tableau de signalisation.

4.2.1.2. Barrières de refroidissement (A2)

Après la détection d'une température supérieure à celle de stockage, un signal électrique est émis pour déclencher la barrière de refroidissement (**données d'entrée**).

Le refroidissement est considéré par certains chercheurs comme un outil d'extinction (Nolan, 1996), où cette dernière est basée sur le démantèlement du triangle du feu par isolation d'un composant.

Dans le cas du refroidissement, la température du fluide stocké diminue (**données de sorties**), ce qui l'empêche d'arriver à la température d'auto-inflammation (TAI) qui, dans ce cas, remplace l'étincelle. Les **données de contrôle** de cette barrière sont l'énergie électrique et le débit du liquide de refroidissement. Ses **mécanismes** sont :

- Réservoir de l'eau ;
- Couronne de refroidissement ;
- Motopompe.

4.2.1.3. Barrière de vidange(A3)

C'est la barrière stratégique qui permet d'éviter le risque majeur, tel que l'incendie, l'explosion, le feu de nappe ou même les effets domino dans le cas où la température de fluide stocké reste élevée(A. Hammouya et al., 2019). Cette barrière assure l'éloignement du fluide inflammable du lieu de risque (**données de sorties**).

Dans le cas des entreprises algériennes, cette barrière est attribuée principalement à un agent de sécurité qui doit intervenir dans des conditions dangereuses. Il faut aussi remarquer que cette barrière a besoin d'une énergie électrique (**données de contrôle**), nécessaire pour faire fonctionner les motopompes, ce qui rend la situation encore plus délicate. Les motopompes permettent d'évacuer le fluide surchauffé dans un autre bac. Cela nécessite la mise en place des vannes spéciales destinées pour cette fonction (**mécanisme**).

D'après cette brève présentation, nous constatons que cette barrière est mal utilisée. Faute de quoi, elle peut aggraver la situation dans ce cas une amélioration s'impose.

4.2.1.4. Barrière d'extinction (A4)

Généralement les feux sont répartis en 05 classes, les feux des hydrocarbures sont considérés comme feu de classe B dans l'état liquide et de classe C dans l'état gazeux.

Ainsi, pour lutter contre les feux de classe B (**données de sorties**), les sociétés pétrolières algériennes utilisent l'extinction par mousse. Généralement ce mode d'extinction est constitué d'une unité de stockage et de dosage, Réserve d'eau, Proportionneur, filtre d'Air, Évacuateur de mousse, Chambre de mousse, motopompe et vannes (**les mécanismes**), ses **données de contrôle** sont l'énergie électrique et la pression.

4.2.1.5. Le facteur humain (A5)

Dans l'industrie algérienne, la première ligne de surveillance et de protection de toutes les parties de l'installation est attribuée à l'homme. Selon le SADT, il interfère avec toutes les activités liées à la protection du réservoir (la surveillance, alarme, refroidissement, drainage et extinction), ce qui signifie qu'il a une fonction primordiale dans le système de sécurité. Cette dépendance absolue entraîne de nombreux risques, dans les cas où ce facteur humain n'est pas qualifié.

4.2.2. Identification des fonctions des barrières

Nous allons utiliser dans cette étape, la première partie de la méthode BORA (Block barrier diagram) avec un évènement initial (l'augmentation de la température) pour identifier les fonctions de chaque barrière du système étudié précédemment, figure 4.3.

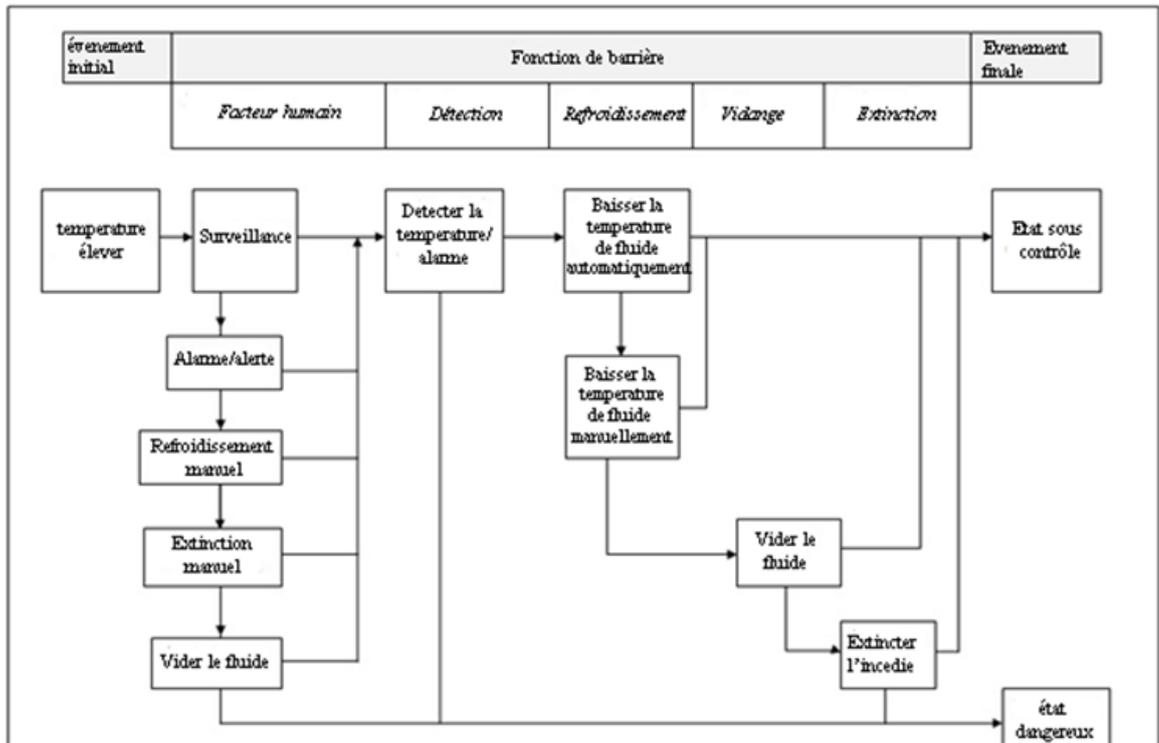


Figure 4.3 : Diagramme de bloc barrière pour le scénario relatif au système de sécurité algérien d'un bac de stockage

Selon la figure 4.3, les fonctions des barrières trouvées dans la section précédente présentent deux scénarios de réussite et d'échec. Ces fonctions sont comme suit :

La fonction du facteur humain (barrière A5) est de superviser et contrôler l'ensemble du système et ses différentes parties. En plus, il est obligatoire en cas de défaillance des systèmes automatiques l'alarme, de refroidissement et d'extinction de les déclencher

manuellement, sans oublier le drainage du produit. L'échec dans l'une de ces fonctions peut aggraver la situation et peut devenir catastrophique.

La fonction de barrière (A1) permet de détecter de la température qui va augmenter dans de telles circonstances. Ce rôle de cette barrière est très important, car il permet de déclencher les autres fonctions. L'échec de cette fonction est donc l'échec de tout le système.

La réduction de la température du liquide stocké en cas de réchauffement continu est la fonction du système de refroidissement (barrière A2). En général, cette barrière fonctionne automatiquement, mais en cas de défaillance, la mise en œuvre de moyens manuels est obligatoire. Si la barrière de refroidissement ne fonctionne pas correctement, l'augmentation de la température entraînera un incendie ou une explosion.

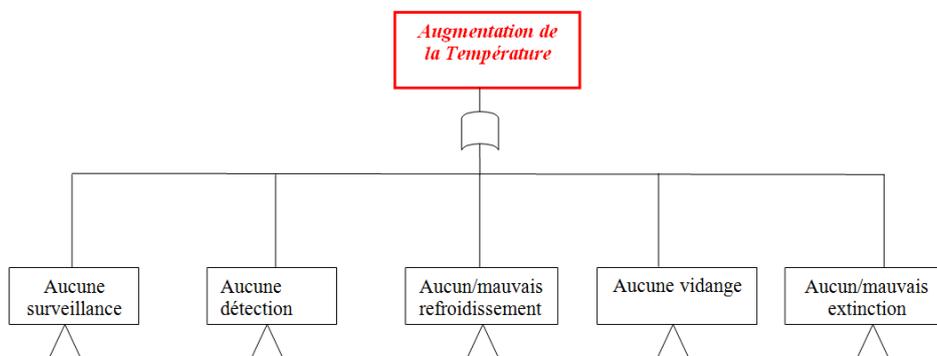
La barrière de vidange (A3) a une fonction d'évacuation du fluide stocké dans les meilleurs délais pour éviter la surchauffe permanente de ce produit et même l'effet DOMINO dans les parcs de stockage. La réussite de cette fonction assure la bonne maîtrise des risques. Cependant, le cas d'échec peut conduire la situation à un état dangereux.

La fonction de la dernière barrière (A4) est d'éteindre l'incendie ou l'explosion qui s'est produit après une aggravation de la situation initiale. La défaillance de cette fonction entraîne une situation dangereuse.

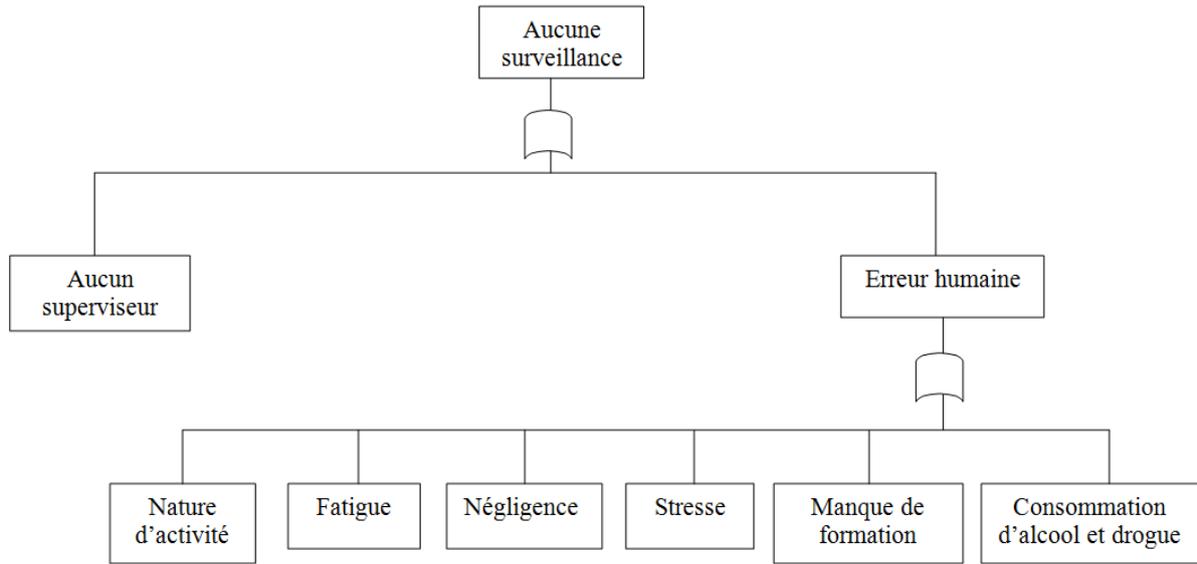
Généralement, la défaillance de l'une des fonctions précédentes peut empirer les choses et peut être hors de contrôle. Cela peut transformer l'événement initial en incendie ou explosion.

4.2.3. Les causes des défaillances du système de sécurité

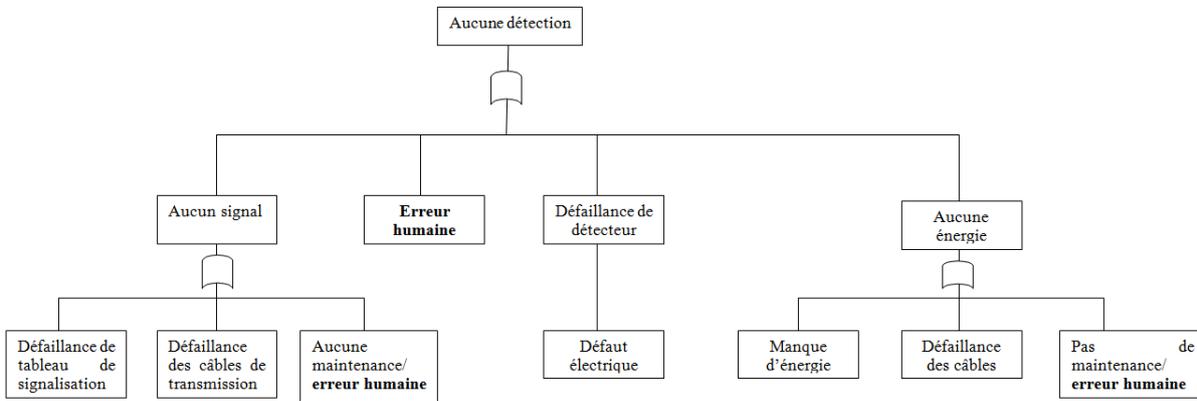
Comme nous avons vu dans la partie d'identification des fonctions des barrières, l'échec d'une fonction peut causer la non-fiabilité du système. Pour cela, nous devons chercher les causes de ces défaillances par la deuxième moitié de la méthode BORA (arbre de défaillance). Les résultats sont illustrés dans la figure 4.4 (a, b, c, d, e et f).



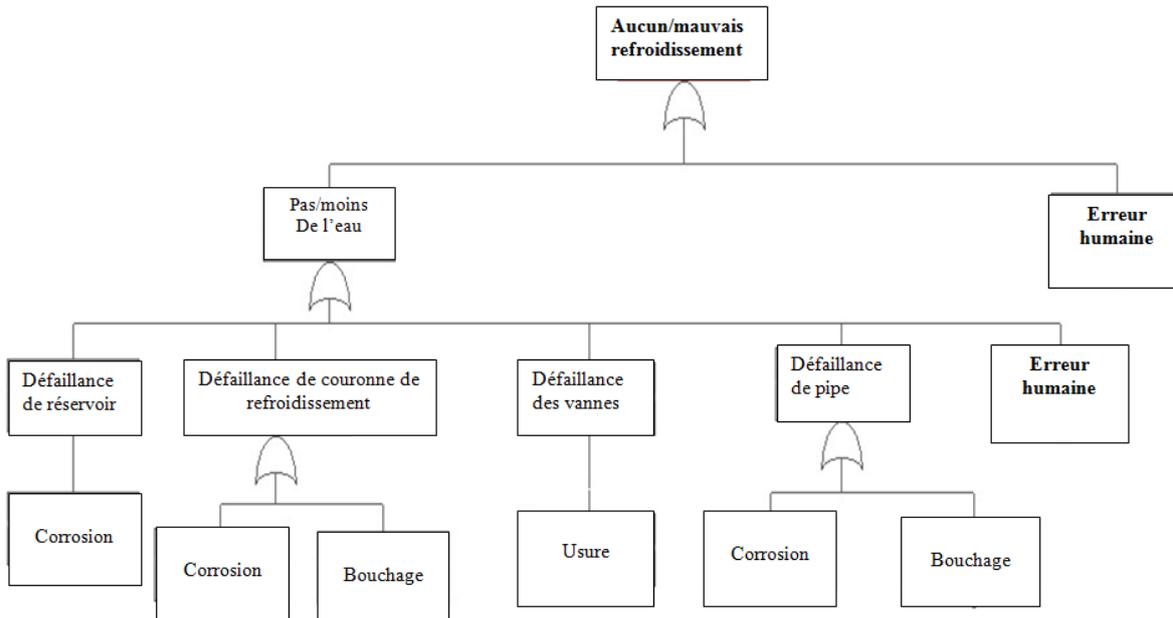
a-Arbre de défaillance du système de sécurité



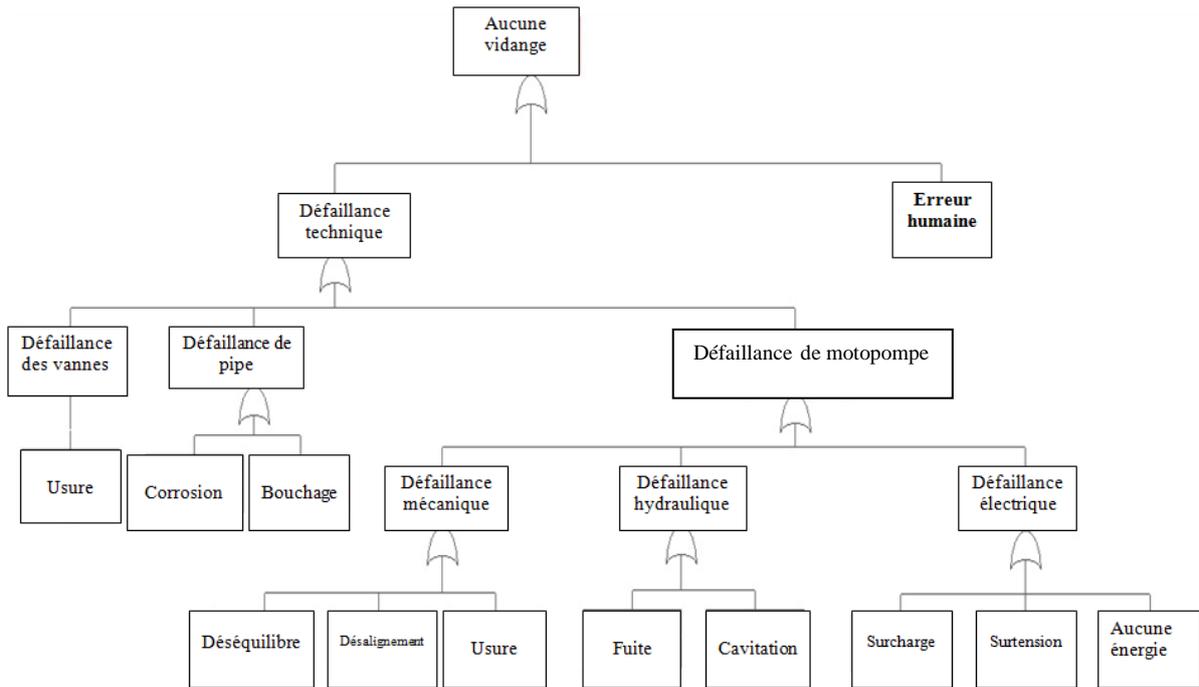
b-Arbre de défaillance de supervision



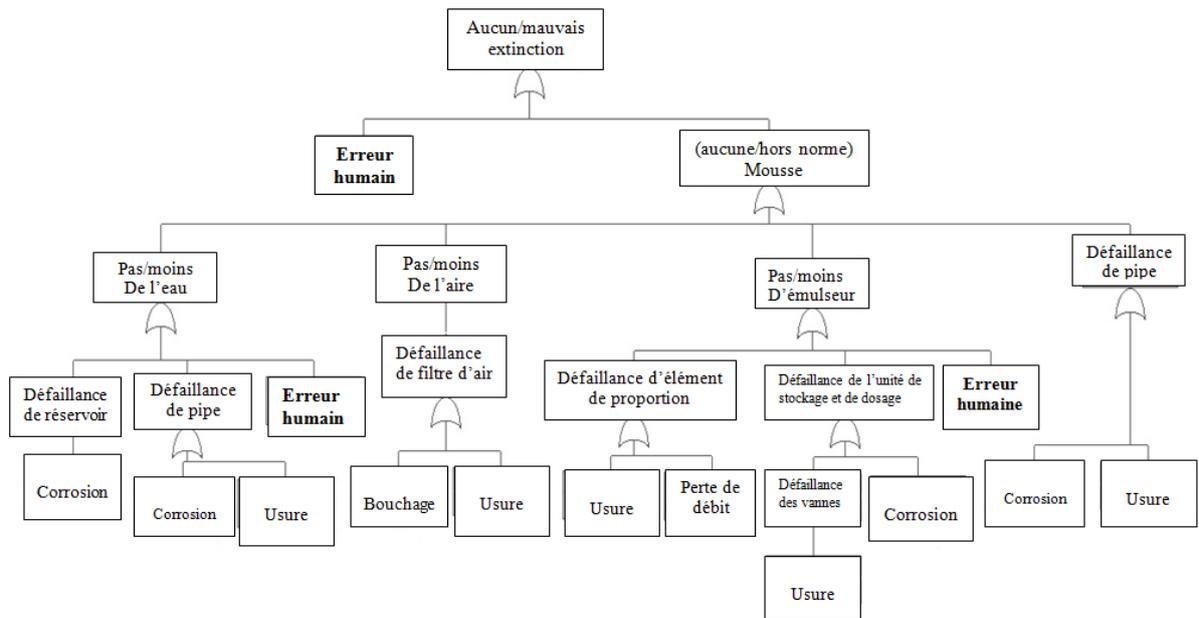
c-Arbre de défaillance de détection



d-Arbre de défaillance de refroidissement



e- Arbre de défaillance de vidange



f- Arbre de défaillance d'extinction

Figure 4.4: Arbre de défaillance appliqué sur le système de sécurité du bac de stockage

D'après la figure 4.4.a, où l'événement initial est la surchauffe du produit stocké. On constate que l'erreur humaine, la non-détection, le mauvais refroidissement, l'absence de drainage et d'extinction sont les principales lignes des causes de défaillance du système étudié.

L'erreur humaine est due généralement à la négligence, à la fatigue, au stress, à la nature de tâche, au manque de formation et d'information, à la motivation, à la sensibilisation, à la consommation des stupéfiants (Médicaments, drogues, etc.), (figure 4.4.b).

Les causes de la non-détection sont l'erreur **humaine**, défaut électrique, défaut dans les câbles de transmission et le manque d'énergie électrique, (figure 4.4.c).

Un incendie ou une explosion se produit si le refroidissement n'a pas été déclenché ou de mauvaise qualité, en présence d'une source de réchauffement. Cette situation est générée par **l'erreur humaine** ou par un manque d'eau causé par une défaillance du réservoir d'eau, de la couronne de refroidissement, des conduits ou même les vannes, (figure 4.4.d).

En général, la vidange du produit dépend de la décision de l'être humain. Donc, **l'erreur humaine** joue un rôle fondamental dans l'échec de cette fonction ainsi que la défaillance des équipements utilisés pour la vidange (motopompe, conduits, vannes, bac de réserve, etc...), (figure4.4.e).

Dans les cas où l'extinction ne fonctionne pas correctement, la cause peut être une **erreur humaine**, ainsi que la qualité de la mousse, (figure 4.4.f).

Cette étude nous a permis de mettre en relief des informations sur les vulnérabilités de système de sécurité dans les entreprises algériennes et leur impact sur la fiabilité de fonctionnement. Cette étude nous a permis aussi de prouver que **l'erreur humaine** est une cause importante parmi toutes les causes des défaillances de ce système.

4.2.4. Rôle de facteur humain dans le SSI utilisé en Algérie

D'après les résultats précédents, on conclut que le rôle de l'être humain dans les installations algériennes est d'une importance primordiale, tableau 4.1.

Ces résultats montrent que l'être humain a un rôle essentiel dans le système de sécurité des bacs de stockage. Il ne se limite pas uniquement à la supervision, le contrôle, l'analyse, et l'évaluation, mais il va plus loin. L'être humain peut aussi exécuter des tâches à caractère techniques, tel que la vidange des bacs de stockage.

La dépendance du SSI au facteur humain peut engendrer des problèmes. Sachant que l'erreur humaine est considérée comme un facteur causal majeur de l'émergence d'accidents dans plusieurs secteurs, dont l'industrie des hydrocarbures (Fuentes-Bargues et al., 2017; Jahangiri et al., 2016). Ces erreurs sont classées en première position parmi les causes d'accidents du travail (Ali et al., 2010; Jung et al., 2020), elles occupent 80% dans le secteur

de l'aviation (Wiegmann & Shappell, 2001) et 63% dans l'industrie chimique (Peters & Peters, 2006).

De ce fait, le facteur humain est considéré comme un point faible du SSI et limiteur de performances et de sécurité (Hadj-MabroukHadj, Habib Abderraouf, 2004).

Les erreurs humaines peuvent être des actions non intentionnelles ou bien par violation (Reason, 1990), cependant ses causes sont généralement non contrôlées et non mesurées. Certains chercheurs renvoient la cause directe de la prise des stupéfiants (Médicaments, drogues et l'alcool) pendant le travail (Minter, 2002). Cependant, d'autres sont plus susceptibles de la fatigue et le stress comme principales causes d'accident(Griffith & Mahadevan, 2011)dues à de nombreux facteurs tel que la monotonie, le facteur psychologique et l'environnement...(Rajeev et al., 2019). En peut aussi mentionner le manque de formation, d'information et d'expérience de l'opérateur (Amel Hammouya & Chaib, 2020; Kovacevic et al., 2016). Plusieurs causes et de différentes sources sont à distinguer et à traiter en priorités.

Tableau 4.1 : Rôle de l'être humain dans le système de sécurité des bacs de stockage

Tache	Rôle de l'être humain
Supervision	Identification des risques Évaluation des risques Contrôle de système Maintenance en cas de défaillance
Détection	Vérification des détecteurs Prendre des prélèvements manuels Déclenchement des alarmes en cas de défaillance d'alarme automatique Alerte en cas d'accident
Refroidissement	Vérification des températures Assurer la fiabilité de système de refroidissement Vérification de prolapsus de l'eau idéale et correcte Vérification l'existence de l'eau Déclenchement de refroidissement manuel
Drainage	Décider le moment de vidange Ouverture des vannes Démarrer la motopompe
Extinction	Déclenchement d'extinction Démarrer les motopompes de réseau d'eau Vérification / maintenir le système Vérification de foisonnement de la mousse Lutte contre l'incendie manuellement

4.3. Evaluation des lois et des textes réglementaires algériens (barrière organisationnelle)

Parmi les barrières organisationnelles les plus importantes, on trouve la législation et les lois stipulées par les autorités et parfois par les entreprises.

Dans le domaine des hydrocarbures, les autorités algériennes ont signé des accords internationaux et édicté un ensemble de lois et textes réglementaires visant à gérer et organiser tous les aspects qui y sont liés.

Tout cela pour protéger les personnes, préserver l'environnement et l'économie algérienne, voire éviter les risques majeurs liés aux activités et gérer les catastrophes.

Nous présenterons dans les tableaux suivants (Tableau 4.2, 4.3 et 4.4), les lois et législations algériennes extraites du Journal Officiel Algérien (*Le Secrétariat général Du Gouvernement*, 2020) pour se faire une idée générale de cette barrière organisationnelle.

Tableau 4.2 : Les textes réglementaires liés aux hydrocarbures

Nature des textes législatifs	Numéro	Date	Titre	Journal Officiel
Lois	Loi n° 19-13	11/12/2019	« régissant les activités d'hydrocarbures »	N° 79 22/12/2019
	Loi n° 86-14	19/08/1986	« Relative aux activités de prospection de recherche, d'exploitation et de transport par canalisations, des hydrocarbures »	N° 35 27/08/1986
	Loi n° 05-07	28/4/2005	« Relative aux hydrocarbures »	N° 50 19/ 7/2005
	Loi n° 13-01 modifiant et complétant la loi n° 05-07	20/2/2013		N° 11 24/2/ 2013
	Loi n°99-09	28/7/1999	« relative à la maîtrise de l'énergie »	N° 51 2/8/1999
Ordonnances	Ordonnance n° 06-10 modifiant et complétant la loi n° 05-07	29/07/2006	« Relative aux hydrocarbures»	N° 48 30/7/ 2006
	Ordonnance n° 74-82	26/8/1974	« relative à la recherche, à l'exploitation, au transport par canalisation des hydrocarbures et au régime fiscal de ces activités »	N° 70 30/8/1974
Décrets	Décret exécutif n° 15-57	08/2/2015	« Fixant les conditions et les modalités d'exercice des activités de stockage et/ou de distribution des produits pétroliers ».	N° 8 15/2/ 2015
	Décret exécutif n°14-349	8/12/2014	« fixant les conditions de mise en conformité des installations et des équipements relevant des activités hydrocarbures »	N°73 23/12/2014
	Décret exécutif n° 14-350	8/12/2014	« Fixant les modalités relatives au financement, par les personnes non résidentes, des dépenses de recherche dans le cadre des contrats de recherche et d'exploitation des hydrocarbures... »	N°73 23/12/2014

	Décret exécutif n°14-94	4/3/2014	« fixant les procédures d'obtention des autorisations requises pour la construction des ouvrages de transport par canalisation des produits pétroliers et de leur exploitation »	N°13 9/3/ 2014
	Décret exécutif n°14-95 modifiant et complétant le décret exécutif n°07-311 du 7 octobre 2007	4/3/2014	« Fixant les procédures de mise à la disposition de l'agence nationale pour la valorisation des ressources en hydrocarbures « ALNAFT » de toutes données et résultats issus des travaux de prospection des hydrocarbures ».	N°13 9/3/2014
	Décret exécutif n° 14-137	20/4/2014	« fixant les procédures d'obtention des autorisations requises pour la construction des ouvrages de raffinage, de transformation des hydrocarbures, et de leur exploitation »	N° 25 04/5/ 2014
	Décret exécutif n° 97-435	17/11/1997	« portant réglementation du stockage et de la distribution des produits pétroliers »	N° 77 26/11/ 1997
	Décret n°88-35	16/2/1988	« Fixant la nature des canalisations et ouvrages annexes relatifs à la production et au transport d'hydrocarbures ainsi que les procédures applicables à leur réalisation »	N° 7 17/2/ 1988
	Décret n° 87-157	21/7/1987	« Relatif à la classification des zones de recherche et d'exploitation des hydrocarbures »	N° 30 22/7/1987

Tableau 4.3 : Les textes réglementaires liés à l'environnement

Nature Des Textes Législatifs	Numéro	Date	Titre	Journal Officiel
LOIS	Loi N°03-10	19/7/2003	« Relative A La Protection De L'environnement Dans Le Cadre Du Développement Durable »	N° 43 20/7/ 2003
	Loi N°01-19	12/12/2001	« Relative A La Gestion, Au Contrôle Et A L'élimination Des Déchets »	N° 77 15/12/2001
	Loi N°83-03	05/02/1983	« Relative A La Protection De L'environnement »	N° 6 08/2/1983
ORDONNANCES	Ordonnance N°74-55	13/5/1974	« Portant Ratification De La Convention Internationale Relative A La Création D'un Fonds International D'indemnisation Pour Les Dommages Dus A La Pollution Par Les Hydrocarbures, Faite A Bruxelles Le 18 Décembre 1971 »	N° 45 04/6/1974

Décrets	Décret Exécutif N° 07-144	19/5/2007	« Fixant La Nomenclature Des Installations Classées Pour La Protection De L'environnement »	N° 34 22/5/ 2007
	Décret Exécutif N° 06-104	28/02/2006	« fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux »	N° 13 5/3/ 2006
	Décret Exécutif N° 06-198	31/5/ 2006	« Définissant La Réglementation Applicable Aux Etablissements Classés Pour La Protection De L'environnement ».	N° 37 04/7/ 2006
	Décret Présidentiel N°98-123	18/4/1998	« Portant Ratification Du Protocole De 1992, Modifiant La Convention Internationale De 1969 Sur La Responsabilité Civile Pour Les Dommages Dus A La Pollution Par Les Hydrocarbures »	N° 25 26/4/1998
	Décret N°81-03	17/1/ 1981	« Portant Ratification Du Protocole Relatif A La Coopération, En Matière De Lutte Contre La Pollution De La Mer Méditerranée Par Les Hydrocarbures Et Autres Substances Nuisibles En Cas De Situation Critique, Fait A Barcelone Le 16 Février 1976 »	N° 3 20/1/ 1981
	Décret N°63-344	11/9/1963	« Portant Adhésion A La Convention Internationale Pour La Prévention De La Pollution Des Eaux De La Mer Par Les Hydrocarbures »	N° 66 14/9/1963

Tableau 4.4 : Les textes réglementaires liés à la sécurité

Nature des textes législatifs	Numéro	Date	Titre	Journal Officiel
LOIS	Loi n° 19-02	17/7/2019	« Relative aux règles générales de prévention des risques d'incendie et de panique ».	N° 46 21/7/2019
	Loi n° 04-20	25/12/2004	« relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable »	N° 84 29/12/2004
	Loi n° 90-03	06/02/1990	« Relative à l'inspection du travail ».	N° 6 du 07/02/1990
	Loi n° 90-11	21/04/1990	« relative aux relations de travail »	N° 17 25/04/1990
	Loi n° 88-07	26/01/1988	« Relative à l'hygiène, à la sécurité et à la médecine du travail ».	N° 4 27/01/1988
Ordonnance	Ordonnance 76-4	20/02/1976	« relative aux règles applicables en matière de sécurité contre les risques d'incendie et de panique	N° 21 12/3/1976

			et la création des commissions de prévention et de protection civile »	
Décrets	Décret exécutif n° 19-157	30/04/2019	« fixant les règles et les conditions du transport de marchandises dangereuses par mer, ainsi que leur séjour et transit dans les ports »	N° 32 15/5/2019
	Décret exécutif n° 15-71	11 /2/2015	« Fixant les conditions et modalités d'élaboration et d'adoption des plans particuliers d'intervention pour les installations ou ouvrages ».	N° 9 18/2/2015
	Décret exécutif n° 09-335	20/10/2009	« Fixant les modalités d'élaboration et de mise en œuvre des plans internes d'intervention par les exploitants des installations industrielles »	N° 60 21/10/2009
	Décret exécutif n° 06-161	17/5/2006	« Déclarant la zone industrielle de Skikda zone à risques majeurs »	N° 33 21/5/2006
	Décret exécutif n° 06-162	17/5/2006	Déclarant la zone industrielle d'Arzew déclarée zone à risques majeurs	N°33 21/5/2006
	Décret exécutif n° 06-163	17/5/2006	« Déclarant le pôle d'In Amenas zone à risques majeurs »	N°33 21/5/2006
	Décret n° 05-10	08/1/2005	« Fixant les attributions, la composition, l'organisation et le fonctionnement du comité inter-entreprises d'hygiène et de sécurité ».	N° 4 09/1/2005
	Décret n° 05-09	08/1/2005	« Relatif aux commissions paritaires et aux préposés à l'hygiène et à la sécurité ».	N° 4 09/1/2005
	Décret n° 05-11	08/1/2005	« Fixant les conditions de création, d'organisation et de fonctionnement du service d'hygiène et de sécurité ainsi que ses attributions ».	N° 4 09/1/2005
	Décret n° 05-12	08/1/2005	« Relatif aux prescriptions particulières d'hygiène et de sécurité applicables aux secteurs du bâtiment, des travaux publics et de l'hydraulique ».	N° 4 09/1/2005
	Décret exécutif n° 05-127	24/4/2005	« Déclarant Hassi Messaoud déclaré zone à risques majeurs »	N° 29 24/4/2005
	Décret exécutif n° 05-476	20/12/2005	« Déclarant Hassi R'mel zone à risques majeurs »	N° 82 21/12/2005
	Décret exécutif n° 05-477	20/12/2005	« Déclarant le pôle de Berkine zone à risques majeurs »	N° 82 21/12/2005
	Décret exécutif n° 2000-73	01/04/2000	« Complétant le décret exécutif n° 93-165 du 10 juillet 1993 réglementant les émissions atmosphériques de fumées, gaz, poussières, odeurs et particules solides des installations fixes ».	N° 18 02/04/2000
	Décret exécutif n°96-158	04/5/1996	« Fixant les conditions d'application des dispositions de sûreté interne d'établissement ».	N° 28 08/5/1996
	Décret présidentiel n° 90-198	30/6/1990	« Portant réglementation des substances explosives ».	N° 27 04/7/ 1990
Décret n°85-	25/8/1985	« Fixant les conditions et modalités d'organisation	N° 36	

231		et de mise en œuvre des interventions et secours en cas de catastrophes ».	28/8/1985
Décret n° 85-232	25/8/1985	« relatif à la prévention des risques de catastrophes »	N° 36 28/8/1985
Décret n° 84-105	12/5/1984	« Portant institution d'un Périmètre de protection des installations et infrastructures du secteur hydrocarbures »	N° 20 15/5/1984

Dans les tableaux 4.2, 4.3 et 4.4, nous avons présenté les textes réglementaires et les normalisations algériennes dans le domaine des hydrocarbures, d'environnement et la sécurité qui ont été extraits du journal officiel algérien.

Nous avons constaté que ces lois sont interdépendantes, par exemple parmi ces réglementations nous avons trouvé les lois relatives aux hydrocarbures liées aux lois environnementales et au développement durable, ceci est dû à la prise en compte des situations dangereuses et des urgences qui sont directement liées à l'environnement, comme les cas de déversements et les fuites de produits stockés.

Après les fameux accidents de 2004 - 2005 à la raffinerie de Skikda et l'accident de 2006 au puits Nezla à Hassi Messaoud, le gouvernement prolifère les lois et en modifie d'autres dans l'espoir d'éviter ce type d'accident. Où nous constatons que la loi des hydrocarbures est passée par quatre (04) étapes, qui sont: la première création de la loi des hydrocarbures était en 1986 par la loi N°86-14, qui est modifiée la première fois en 2005 par la loi N° 05-07, la dernière a été modifiée par l'Ordonnance n° 06-10 en 2006, puis à nouveau modifiée en 2013 par la loi n°13-01 ; et pour réglementer et régir les activités d'hydrocarbures, la loi n°19-13 a été ajoutée en 2019. En ce qui concerne la loi environnementale, nous avons noté qu'il y a également des amendements, car la loi n° N° 83-03 a été modifiée par la loi 03-10, sans oublier les décrets et les ordonnances qui sont ajoutés périodiquement pour renforcer ces lois. Pour les lois de sécurité, nous avons constaté qu'il n'y a pas d'amendement direct aux lois, mais qu'elles sont complémentaires les unes des autres.

Nous constatons également que les zones industrielles de Hassi Mesaoud, Hassi R'mel, Berkine, Arzew, In Amenas et Skikda n'ont été considérées comme zones à risques majeurs qu'entre l'année 2005 et 2006, alors que la nationalisation des hydrocarbures a eu lieu le 24 février 1971, donc après 35 ans.

Après un examen approfondi de ces règlements, nous avons remarqué qu'ils contiennent des thermologies reliés au domaine de ces textes réglementaires, des accords internationaux, ainsi que des textes réglementaires organisationnels et dissuasifs.

Pour les thermologies, on peut citer par exemple la définition des hydrocarbures liquides qui a été mentionné dans la loi relative aux hydrocarbures n° 13-01 dans son article. 5, comme suit : « *Le pétrole brut, les liquides de gaz naturel et les gaz de pétrole liquéfiés* », et pour les produits pétroliers on trouve la définition suivante : « *Tous les produits résultant des opérations de raffinage, y compris les lubrifiants et les bitumes, ainsi que les gaz de pétrole liquéfiés* ». Sans clarification ni classification, ces définitions restent incomplètes et inexactes.

En ce qui concerne la définition de l'environnement, n'était pas claire dans la première loi sur l'environnement N° 83-03. Elle a été modifiée par la loi N° 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le contexte du développement durable. Cette loi définit l'environnement comme « *Les ressources naturelles abiotiques et biotiques telles que l'air, l'atmosphère, l'eau, le sol et le sous-sol, la faune et la flore y compris le patrimoine génétique, les interactions entre lesdites ressources, ainsi que les sites, les paysages et les monuments naturels* ».

Cependant, la loi n°04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs définissait les risques comme : « *toute menace probable pour l'homme et son environnement pouvant survenir du fait d'aléas naturels exceptionnels et/ou du fait d'activités humaines* », les barrières de sécurité sont mentionnées comme « *dispositif* » ou bien « *mesures de prévention* », et le système de sécurité comme « *système de prévention* », tandis que les autres fonctions du système sont exclues telles que la protection, le contrôle...etc.

En général, nous remarquons que ces définitions manquent de précision et sont très brèves en comparaison avec les normes internationales et européennes.

En ce qui concerne les accords internationaux, on prend par exemple l'ordonnance n° 74-55 du 13 mai 1974, cet accord international prévoit la création d'un fonds international destiné à l'indemnisation en cas de dommages résultant de la pollution par les hydrocarbures. Le décret n° 81-03 du 17 janvier 1981, est un protocole relatif à la coopération pour de lutter contre la pollution des hydrocarbures et des produits nuisibles au niveau du bassin méditerranée en cas des situations critiques.

Ainsi, comme textes réglementaires organisationnels il y a le décret exécutif n° 97-435 du 17 novembre 1997 et le décret exécutif n° 15-57 du 8 février 2015. Ces deux décrets ont pour but d'organiser toutes les activités liées au stockage et distributions des produits pétroliers. Il existe aussi l'article 16 de la Loi N°03-10 du 19 juin 2003 qui détermine le

contenu de l'étude d'impact sur l'environnement pour qu'il soit uni et clair pour toutes les entreprises.

Cependant, les textes réglementaires dissuasifs viennent à décourager tout acte d'altération et toute atteinte à l'intérêt public afin de réduire les dangers imprévus, dans cette gamme de textes, il y a l'Article 69 et Article 70 de la Loi n°83-03 du 5 février 1983 qui déterminent les sanctions applicables en cas de violation de l'accord international prévoyant la protection de l'eau de mer contre la pollution par les hydrocarbures. Cependant, L'article 33 de la loi n° 19-02 du 21 juillet 2019 détermine les sanctions en cas d'inobservation des mesures de sécurité.

De plus, le législateur algérien, dans certains cas, s'appuie sur la société civile qui était clair dans la loi N° 03-10 sur l'environnement qui encourage les associations environnementales. Celles-ci sont les plus proches et interagissent les problèmes environnementaux de la société. Cela se reflète par le grand nombre d'associations qui augmente chaque année, comme le montrent les dernières statistiques du ministère de l'Intérieur, des collectivités locales et de l'aménagement du territoire algériens en 2020, ce nombre a atteint 2505 associations. La loi N° 03-10 a également permis à ces entreprises d'avoir le pouvoir de poursuivre toute personne ayant causé des dommages à l'environnement, conformément à l'article 36 de la même loi. Cependant, on peut signaler qu'un certain nombre d'associations restent inefficaces malgré tous les encouragements fournis par l'état.

Malgré cela, de nombreuses lacunes sont présentes dans les textes réglementaires, car elles ne traitent que les grandes lignes sans entrer dans les détails. Compte tenu de ces lacunes du côté professionnel, les entreprises algériennes utilisent d'autres normes et procédures pour combler et renforcer le système de sécurité. Parfois, pour accomplir les aspects organisationnels du travail dans ces domaines, on fait appel aux normes internationales, et européennes.

4.4. La réalité des raffineries algériennes face aux accidents industriels

Le système de sécurité industriel montre de temps en temps ces faiblesses, qui se traduisent par des accidents néfastes. L'accident de l'unité 40 de la raffinerie de Skikda survenu le 19 janvier 2004 a laissé sa marque sur les autorités algériennes et les responsables de la SONATRACH. Cette explosion a enregistré un grand nombre de dommages sans oublier l'état d'effolement causé à la région, à savoir :

- Des pertes humaines : 27 décès et 74 blessés ;

- Des pertes économiques : Parmi ces pertes il y a 3 unités détruites évaluées à environ 4 milliard de dollars ;
- Pollution de l'environnement.

Un autre accident survenu le 5 octobre 2005, à la suite de l'explosion des bacs 105 et 106 après une fuite de gaz. Elle a causé : 2 décès, 7 blessures, 6 millions \$ de pertes économique et bien sûr la pollution.

Ces deux accidents sont enregistrés les plus catastrophiques durant cette période à l'échelle nationale et même internationale. Ils ont été considérés comme les pires scénarios survenus dans les raffineries algériennes.

Dans le tableau suivant, nous présentons les statistiques des accidents au niveau de la raffinerie de Skikda durant la période 2002- 2016, à travers les statistiques présentées dans la littérature (Chettouh, 2021; CHETTOUH, 2016; Chettouh et al., 2016, 2018; Chettouh & Hamzi, 2015).

Tableau 4.5 : Les accidents et les incidents déclarés de la raffinerie de Skikda pour la période de 2002-2016

Année	Nombre d'accidents	Nature des accidents				Perte humaine	
		Incendie	Explosion	Dispersion de produit	Autres	Blessées	Mortes
2002	1	1	0	0	0	1	0
2003	3	3	0	0	0	8	0
2004	4	3	1	0	0	74	27
2005	3	1	1	1	0	7	2
2006	4	3	0	1	0	0	0
2007	3	1	0	0	2	0	2
2008	2	1	1	0	0	0	0
2009	5	4	1	0	0	3	0
2010	4	3	0	1	0	3	0
2011	3	0	0	2	1	0	0
2012	5	1	2	1	1	6	0
2013	12	7	2	2	1	3	1
2014	3	2	0	1	0	2	0
2015	2	0	1	1	0	2	0
2016	3	2	1	0	0	18	0
TOTALE	57	32	10	10	5	127	32

Nous présenterons ses statistiques sous forme d'histogrammes dans les figures 4.5, 4.6 et 4.7.

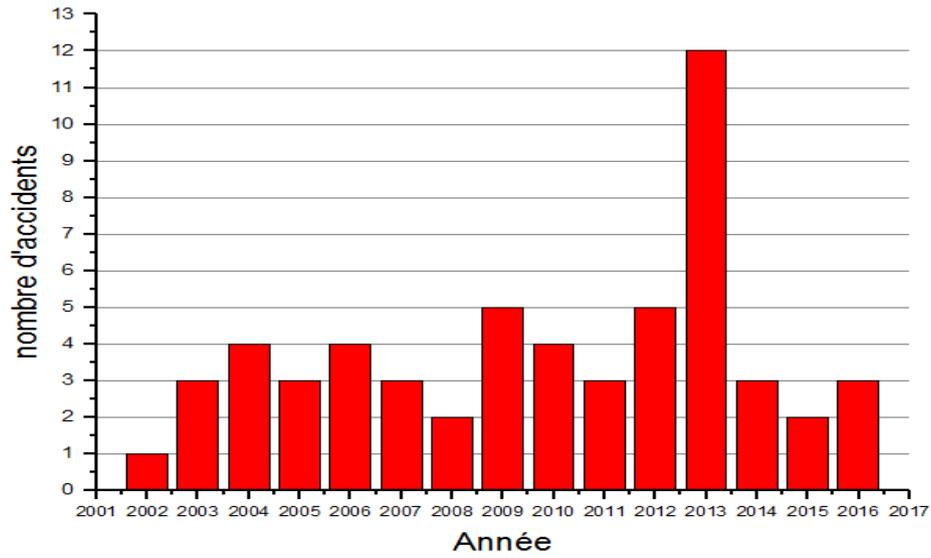


Figure 4.5 : Nombre des accidents et incidents

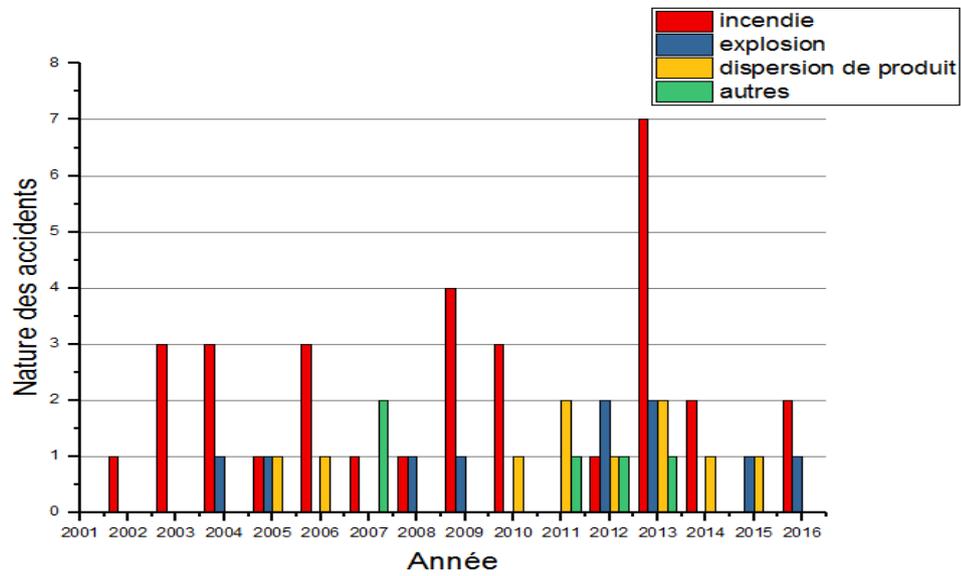


Figure 4.6 : Nombre de différents accidents et incidents

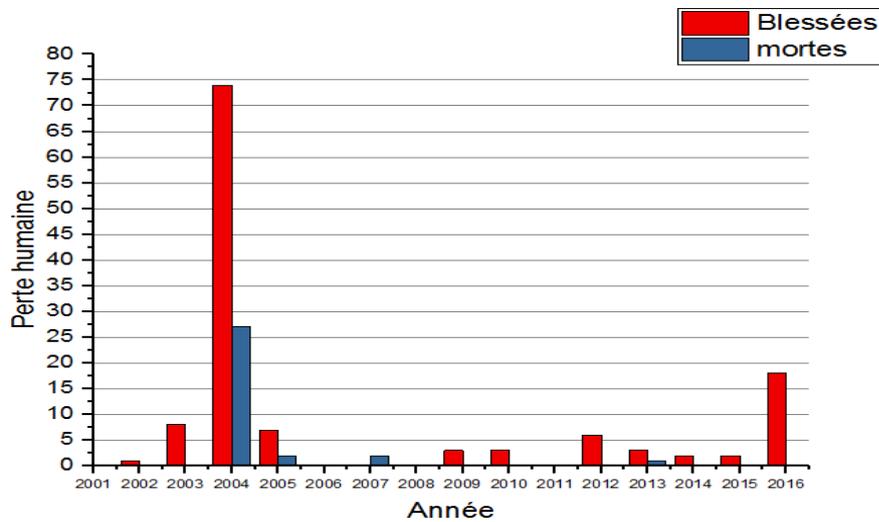


Figure 4.7 : Nombre de victimes

Dans le tableau suivant, le niveau de risque est déterminé en utilisant la matrice de risque (voir figure 2.1 dans chapitre 2), dans lequel les couples (fréquence - gravité) sont définis.

Tableau 4.6 : Taux de fréquence et de gravité des accidents du travail

Année	Probabilité d'occurrence	gravité	Niveau de risque
2002	1	1	1
2003	2	2	4
2004	2	4	8
2005	2	4	8
2006	2	1	2
2007	2	4	8
2008	2	1	2
2009	2	2	4
2010	2	2	4
2011	2	1	2
2012	2	3	6
2013	3	4	12
2014	2	1	2
2015	2	2	4
2016	2	3	6

D'après ces données nous remarquons que le nombre total d'accidents survenu au cours de la période 2002 - 2016 est de 57 accidents. C'est un nombre énorme en 14 ans dans une seule raffinerie. Ces accidents sont répartis entre incendies, explosions, dispersions de produits et autres accidents (tableau4.5).

Cette répartition n'est pas constante et diffère d'une année à l'autre (figure 4.6). Globalement durant ces 14 années, les accidents dus aux incendies représentent 56,14% du total enregistré, avec l'année 2013 est la plus remarquable, parce que 7 incendies ont été enregistrés, suivi des explosions et des dispersions de produit qui sont respectivement 17,54% pour chacune d'elles.

D'après le (tableau4.6), les années 2002, 2006, 2008, 2011 et 2014 sont les années avec un niveau de risque le plus faible (entre 1 et 2), car ils ont caractérisé par une faible probabilité d'occurrence et faible gravité de ses accidents. Par contre les années de niveau de risque le plus élevé sont : 2004, 2005, 2007 et 2013.

Nous avons constaté que les lois algériennes n'ont pas eu d'impact réel sur ces accidents et incidents, car le nombre d'accidents a continué à fluctuer et ne s'est pas stabilisé ou n'a pas diminué (figure 4.5). L'effet peut être considéré comme temporaire et non permanent, et cela peut être dû à la présence de lacunes dans les lois ou dans la manière dont elles sont appliquées.

Alors que nous constatons que ces lois ont un effet direct et relatif sur le nombre de victimes, celui-ci a considérablement diminué (figure 4.7), en particulier le nombre de décès, qui a disparu pendant plusieurs années, pour réapparaître en 2013 avec un seul cas.

D'autre part, nous remarquons qu'à presque après chaque pic d'incidents et accidents, le législateur algérien publie ou actualise une des lois pour tenter de combler les lacunes, par exemple en 2006 (Ordonnance n° 10-06 complétant la loi n° 07-05 relative aux hydrocarbures) et en 2013 (Loi n° 13-01).

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une étude analytique et critique du système de sécurité des bacs de stockage au niveau des entreprises pétrolières Algérienne.

Nous avons trouvé que ce système de sécurité comprend un ensemble de barrières interconnectées et complémentaires qui occupent des fonctions visant à assurer la protection et la stabilité économique et environnementale de l'entreprise. Parmi ces barrières, il ya le drainage, dans lequel, nous constatons qu'il a été utilisé de mauvaise manière et dangereuse, car cette barrière dépend de l'énergie électrique alors que les normes de sécurité exigent que le courant électrique soit coupé en cas de situation dangereuse. Nous avons également constaté sa dépendance totale du facteur humain où l'erreur est probable.

Ainsi, d'après les causes des défaillances, nous constatons que le point faible de ce système est le facteur humain. Pour cela l'amélioration continue de cette barrière revient à la formation, l'information, l'inspection...etc., dans lesquelles le staff d'entreprise doit prendre en charge ce type d'organisation.

La barrière organisationnelle étudié dans ce chapitre est basée sur les textes règlementaires algériens publiés par le Secrétariat général du gouvernement, l'analyse de cette barrière a montré que malgré toutes les améliorations, il existe encore des lacunes qui obligent les entreprises algériennes à utiliser d'autres normes et législations internationales pour couvrir la carence.

Ainsi, nous avons remarqué qu'il y a une relation entre les textes législatifs algériens et les accidents qui se produisent dans les entreprises, où Il existe une influence mutuelle entre les textes règlementaires et les accidents en termes de nombre ou de gravité.

Finalement, certaines questions concernant notre problématique ont trouvées des réponses dans ce chapitre.

Chapitre 5

**Le modèle d'amélioration proposé
pour le système de sécurité d'un bac
de stockage d'hydrocarbure**

Chapitre 5. Le modèle d'amélioration proposé pour le système de sécurité d'un bac de stockage d'hydrocarbure

5.1. Introduction

L'amélioration continue de système de sécurité des bacs de stockage est très importante à nos jours, généralement cette amélioration peut être dans ses composants : humain, organisationnel et technique. Étant donné que le facteur humain contribue à toutes les parties du système, et son erreur est attendue (comme expliqué au chapitre 4), il est nécessaire de l'améliorer grâce à la formation continue, la sensibilisation, les inspections périodiques, etc. L'amélioration peut toucher aussi les procédures et les lois par les révisions et le critique continue. Quant à l'aspect technique du système, il a connu un des développements dans le domaine de prévention et de protection: malheureusement la technique de vidange n'a pas vraiment connu un grand intérêt.

Dans ce chapitre, nous allons basés sur l'amélioration d'une des barrières techniques de prévention des bacs de stockage, qui nommer par la cuvette de rétention avec cette amélioration on peut protéger non seulement notre bac et notre produit par le vider en toute sécurité dans une cuvette souterraine, mais aussi la protection des vies humaines ainsi que l'environnement.

Cette amélioration avait pour fonction de récupérer, en peu de temps, le produit inflammable, et par conséquent de réduire la pollution d'éviter le feu de nappe de limiter la vaporisation du produit d'éviter la destruction du réservoir et de protéger le produit.

5.2. Méthodes et matériel

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, généralement, dans les réservoirs de stockage des hydrocarbures, le système de sécurité est compris deux types. La première est celle de la prévention, qui vise à détecter le danger et même à déclencher le refroidissement du bac de stockage. Le second c'est le système de protection (vidange et extinction) en cas d'incendie (Figure 5.1).

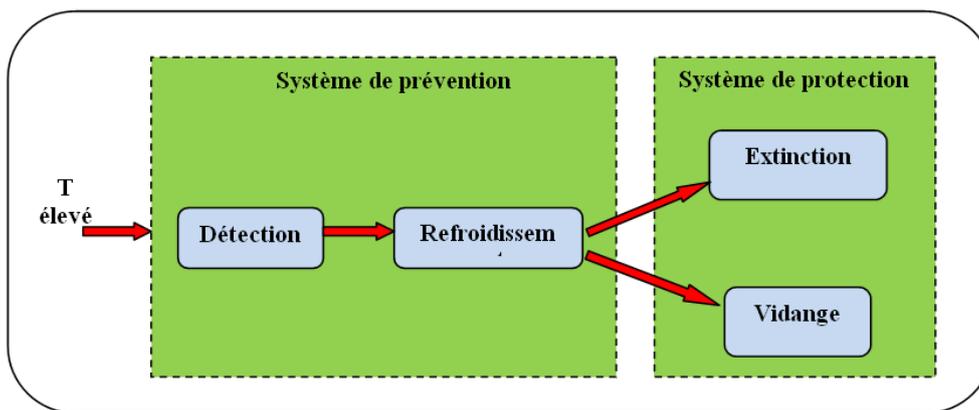


Figure 5.1 : Système de sécurité de bac de stockage

5.2.1. Matériel

Le cas d'étude est un réservoir de stockage cylindrique en acier allié, rempli par le benzène avec les caractéristiques suivantes, comme indiqué dans les tableaux 5.1, 5.2 et 5.3 (Jimenez-Gonzalez & J.C.Constable, 2011; p cheremisinoff, 2000; *SOLIDWORKS Data Base Version (2016), 2019*).

Tableau 5.1: Caractéristiques du bac

CARACTÉRISTIQUES DU BAC	
Volume du bac (m ³)	59850
Volume de remplissage (m ³)	50764
Diamètre (m)	66,78
Hauteur du bac (m)	17,08
Hauteur de liquide (m)	14

Tableau 5.2: Caractéristiques de benzène C₆H₆

CARACTÉRISTIQUES DE BENZÈNE	
Température d'ébullition (K)	353,3
Température critique, (K)	562,1
Pression critique (N/m ²)	4,89 *10 ⁶
LIE	1,2%
LSE	7,8%

Tableau 5.3: Caractéristiques des parois

ACIER ALLIE	
Limite d'élasticité (N/m ²)	6,20422*10 ⁸
Limite de Traction (N/m ²)	7,23826*10 ⁸
Module d'élasticité (N/m ²)	2,1*10 ¹¹
Coefficient de Poisson	0,28
Densité (kg/m ³)	7700
Module de cisaillement (N/m ²)	7,9*10 ¹⁰

5.2.2. Méthodologie

Ce travail est basé sur trois étapes principales (figure 5.2), la première étape est la démonstration de l'effet de vidange, ensuite nous allons présenter un modèle de vidange amélioré, et la dernière étape est la vérification de ce modèle.

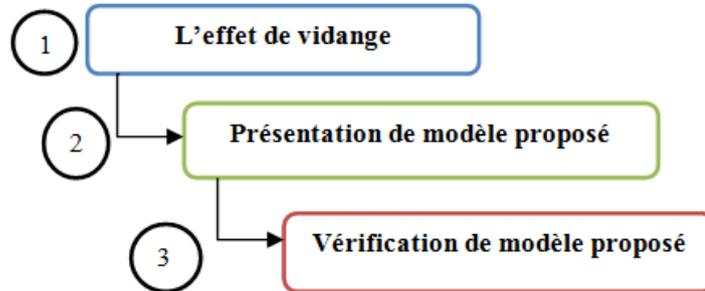


Figure 5.2 : Méthodologie de travail

5.2.2.1. L'effet de vidange

Pour étudier l'effet de vidange, nous allons adopter trois étapes, comme illustrer la figure 5.3. La première étape consiste à déterminer l'effet de vidange sur le système de sécurité, tandis que la deuxième étape consiste à vérifier les conséquences de cette barrière sur l'environnement du bac, et la dernière étape consiste à vérifier son effet sur le bac de stockage.

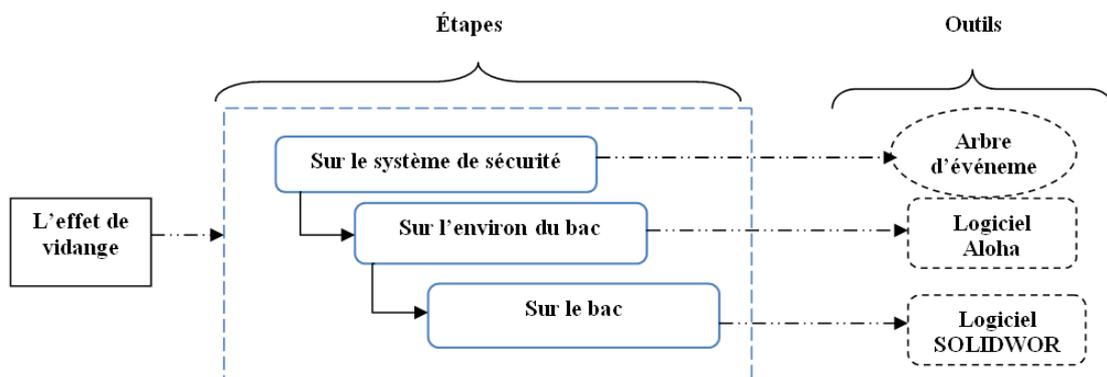


Figure 5.3 : Les étapes de l'étude de l'effet de vidange

5.2.2.1.1. L'effet de la vidange sur le système

Pour identifier l'effet de la barrière drainante sur le système de sécurité, deux cas ont été étudiés par la méthode de l'arbre d'événements (méthode de l'arbre des conséquences ou méthode de l'Étree) (voir chapitre 2), le premier système était composé de seulement trois barrières (détection, refroidissement, extinction), et la seconde lors de l'ajout de la barrière de vidange, sachant que l'événement initial était l'augmentation de la température.

5.2.2..2.L'effet de la vidange sur l'environnement du bac

Pour cette étape nous avons utilisé le logiciel ALOHA (Areal Location of Hazardous Atmospheres) Version 5.4.6 (NOAA's National Ocean Service, 2015) pour identifier les zones dangereuses (gaz toxiques et effets thermiques) en fonction du taux de vidange (17%, 27%, 37%, 47%, 57%, 67%, 77%, 87%) d'un réservoir rempli de benzène dans les conditions climatiques suivantes:

- La vitesse du vent était de 3 m/s ;
- La température de l'air était de 293 k ;
- L'humidité relative était de 75%.

La représentation de la modélisation a été montrée dans la figure 5.4.

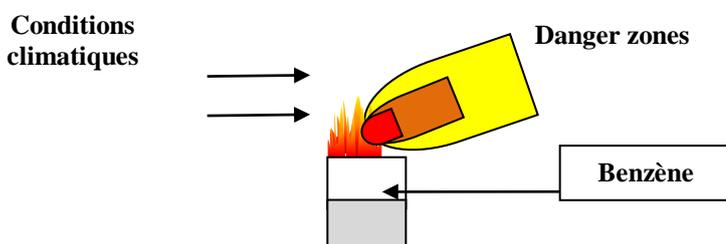


Figure 5.4: Représentation schématique de la modélisation et de son environnement

5.2.2..3.L'effet de la vidange sur le bac de stockage

Pour déterminer l'effet de la barrière de vidange sur le réservoir de stockage, nous allons faire une analyse comparative entre deux états du réservoir; le premier état est l'état critique (tableau 5.4), le second est le cas d'ébullition (tableau 5.5). Cette comparaison est réalisée à l'aide d'une étude statique qui a examiné les paramètres de contrainte, de déplacement et de déformation représentés respectivement par les équations suivantes (fanchon, 2008):

La contrainte donnée par

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (MPa) \quad (5.1)$$

Le déplacement donné par

$$D = \Delta l \quad (m) \quad (5.2)$$

La déformation donnée par

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5.3)$$

Nous allons utiliser le code de simulation du logiciel SOLIDWORKS version 2016 pour vérifier l'effet de vidange sur le bac de stockage. C'est un outil qui peut apporter des

solutions aux problèmes des concepts d'analyse des contraintes, déplacements et déformations ... (Kurowski, 2013)

Tableau 5.4: Paramètres utilisés dans le cas critique

Pression externe (N/m²)	101325
Température externe (K)	289
Pression interne (N/m²)	4890000
Température interne (K)	562.1
Gravité (m/s²)	9.81

Tableau 5.5: Paramètres utilisés dans le cas d'ébullition

Pression externe (N/m²)	101325
Température externe (K)	289
Pression interne (N/m²)	101325
Température interne (K)	353.3
Gravité (m/s²)	9.81

5.2.2.2. Choix et présentation de modèle proposé de vidange

Pour choisir un modèle, il faut tout d'abord trouver la bonne section d'orifice de vidange qui correspond au cas d'étude, donc cette partie de travail comprend 2 étapes (voire figure 5.5).

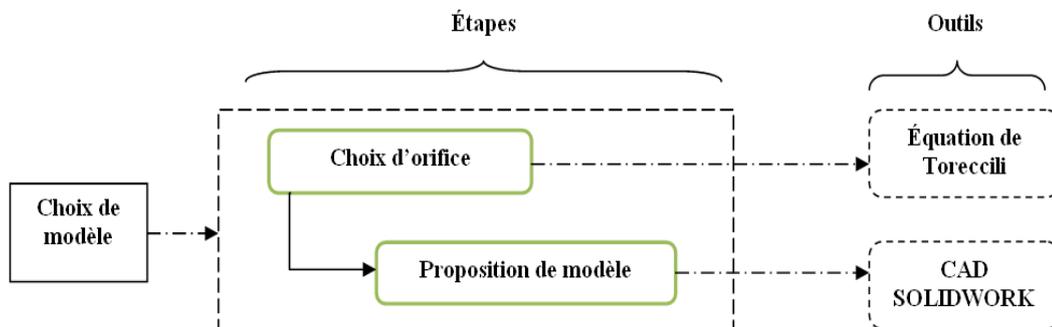


Figure 5.5 : Les étapes de l'étude de Choix de modèle

5.2.2.2.1. Choix d'orifice

Le choix du rayon d'orifice (r) pour le modèle de vidange proposé est basée sur l'expression de temps de vidange (théorème de Toriccoli), cette expression rassemble : de temps de vidange, rayon de bac, rayon d'orifice de vidange, hauteur de produit et la gravité, (figure 5.6) (Monavon, 2010; V.Giles, 1986).

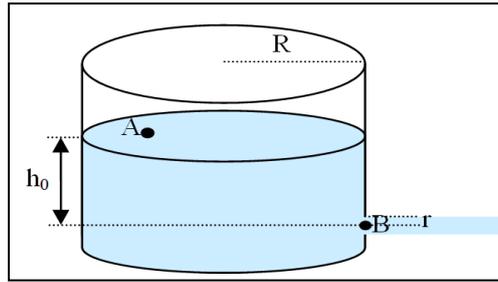


Figure 5.6 : Principe de vidange d'un réservoir

On commence par l'expression de conservation de débit,

$$Q_1 = Q_2 \quad (5.4)$$

Sachant que :

$$Q = Sv \quad (5.5)$$

On trouve que l'égalité soit :

$$S_A v_A = S_B v_B \quad (5.6)$$

$$v_A = S_B v_B / S_A \quad (5.7)$$

$$v_A = v_B \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \quad (5.8)$$

$$v_A = v_B \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (5.9)$$

D'après la formule de Torricelli :

$$v_B = \sqrt{2gh} \quad (5.10)$$

Donc :

$$v_A = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \sqrt{2gh} \quad (5.11)$$

Vectériellement on trouve que l'équation devient :

$$\vec{v}_A = -\left(\frac{r}{R}\right)^2 \sqrt{2gh} \vec{e}_z \quad (5.12)$$

Et on a d'autre part :

$$\vec{v}_A = \frac{dh}{dt} \vec{e}_z \quad (5.13)$$

De 5.12 et 5.13 on a :

$$\frac{dh}{dt} \vec{e}_z = -\left(\frac{r}{R}\right)^2 \sqrt{2gh} \vec{e}_z \quad (5.14)$$

Donc on trouve l'équation différentielle de vidange :

$$\frac{dh}{dt} = -\left(\frac{r}{R}\right)^2 \sqrt{2gh} \quad (5.14)$$

Après la résolution de l'équation on trouve l'expression de temps de vidange :

$$t = \left(\frac{R}{r}\right)^2 \sqrt{\frac{2}{g}} (\sqrt{h_0} - \sqrt{h}) \quad (5.15)$$

Si on vide le réservoir totalement donc la hauteur $h=0$ alors l'expression de temps de vidange être :

$$t = \left(\frac{R}{r}\right)^2 \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \quad (5.16)$$

Pour calculer le débit on utilise l'équation suivante :

$$Q = V/t \quad (5.17)$$

Avec :

Q	: débit	(m ³ /s)
v	: vitesse	(m/s)
S	: section	(m)
t	: temps de vidange d'un réservoir	(s)
R	: rayon du bac	(m)
r	: rayon d'orifice	(m)
g	: gravite	(m/s ²)
h ₀	: hauteur de produit	(m)
h	: hauteur final	(m)
V	: volume de produit	(m ³)

5.2.2.2.2. Proposition de modèle de vidange

À base de rayon d'orifice et les dimensions de bac, on va choisir les grandeurs de modèle proposé. Ce modèle a été conçu par la version CAD 2016 Solidworks.

5.2.2.3. Vérification de modèle proposé

Cette étape est basée sur une comparaison (figure 5.8) entre le modèle de vidange simple (modèle 1) qui nécessite l'existence des motopompes (M), avec un autre modèle

proposé (modèle 2) qui ne nécessite aucune énergie supplémentaire pour accomplir la mission (figure 5.7).

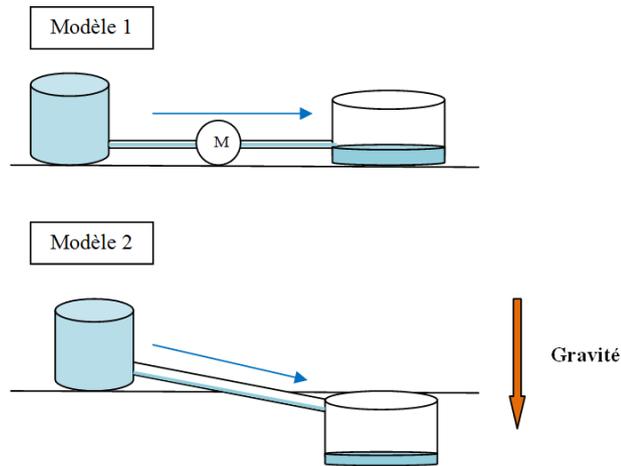


Figure 5.7 : Les modèles de l'étude

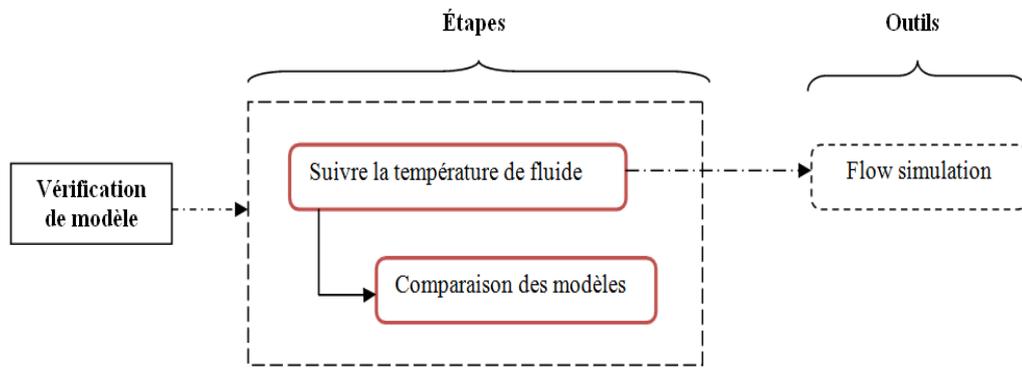


Figure 5.8 : Méthodologie de la Vérification de modèle proposé

5.3. Résultat et discussion

5.3.1. L'effet de vidange

5.3.1.1. L'effet sur le système

Dans cette partie, nous avons analysé les risques liés au bac de stockage et son système de sécurité par l'arbre d'évènement, sachant que l'augmentation de la température est considérée comme l'évènement initiateur, et les barrières de système de sécurité sont la base de cette étude, et en conséquence nous avons étudié deux (02) cas : sans et avec barrière de vidange (figure 5.9, figure 5.10).

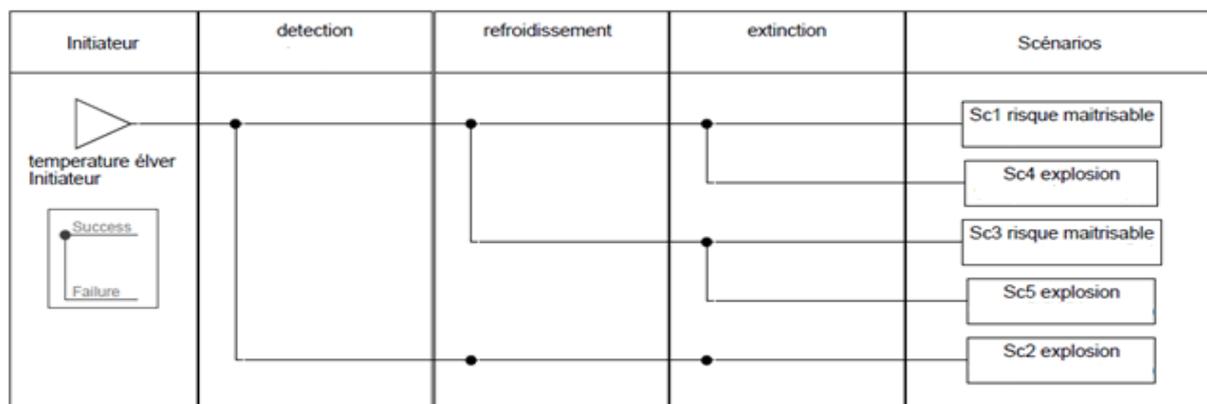


Figure 5.9 : Arbre d'événement d'un bac de stockage sans la vidange

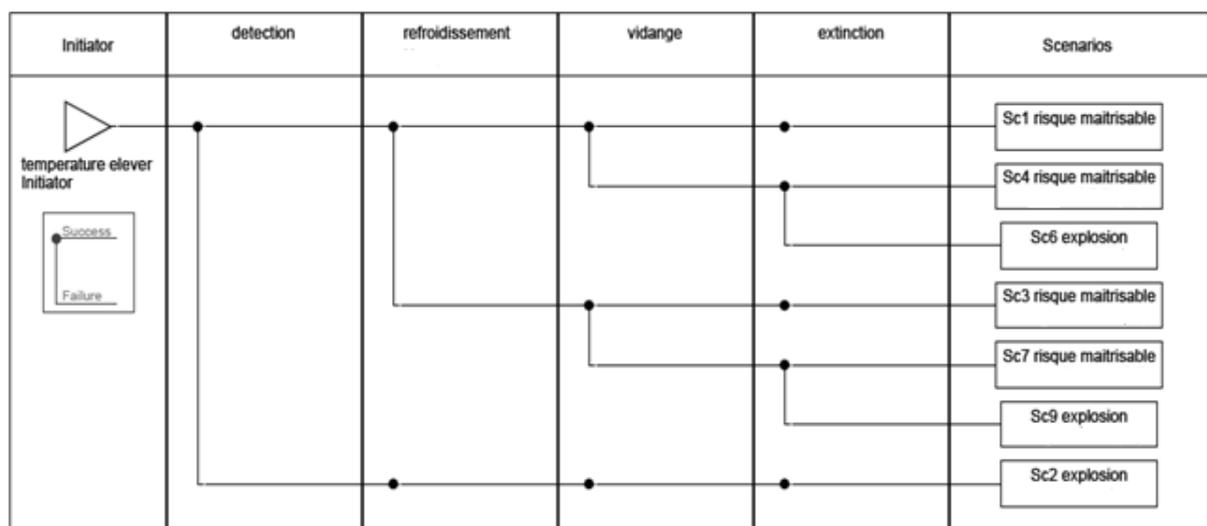


Figure 5.10 : Arbre d'événement d'un bac de stockage avec la vidange

Les figures ci-dessus et montrent les arbres d'événements des systèmes étudiés (sans « figure 5.9 » et avec la barrière de vidange « figure 5.10 »).

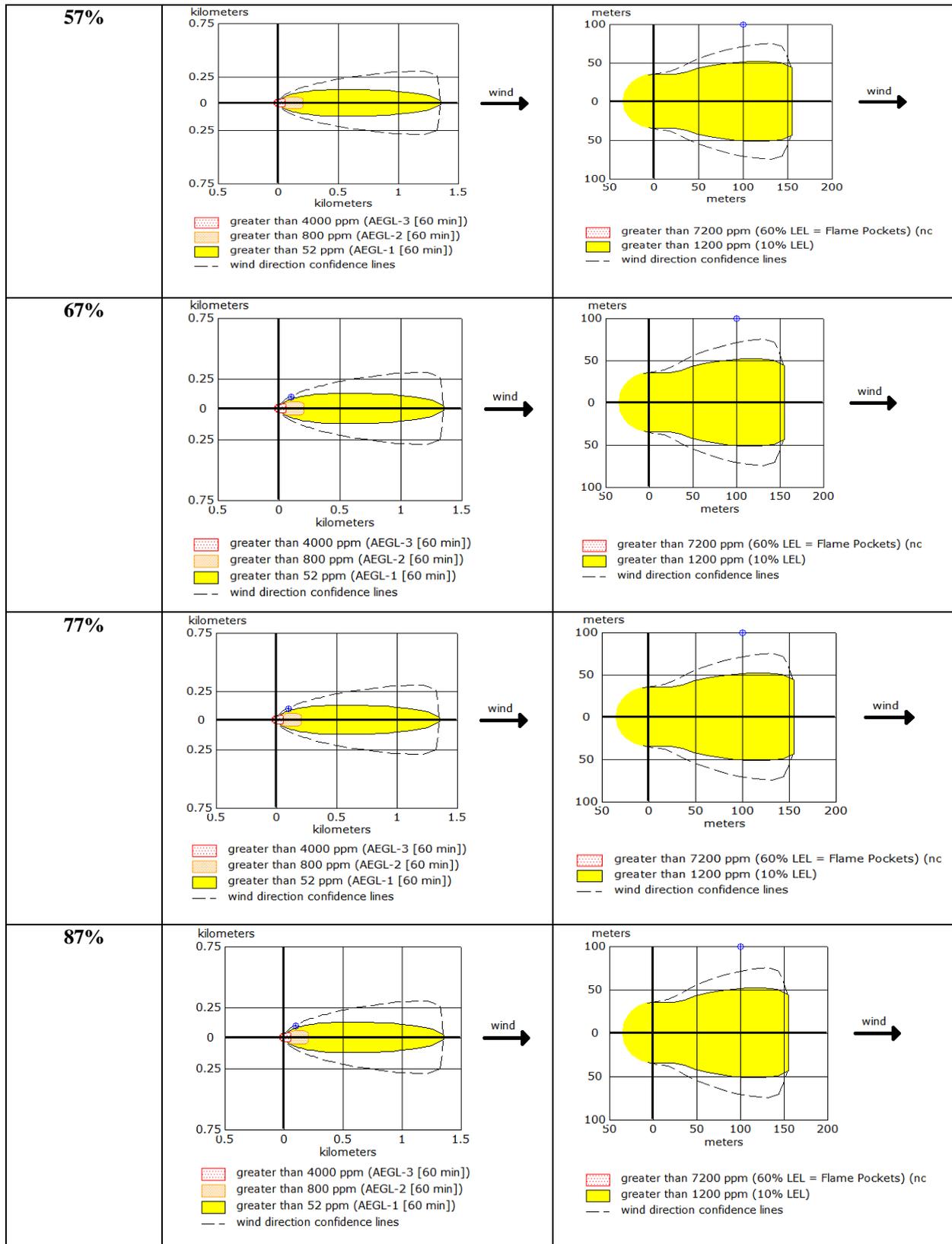
Nous constatons qu'avec le premier cas, cinq scénarios ont été trouvés (Figure 5.9), dont trois représentent des conséquences indésirables. Cependant, avec la barrière de vidange (Figure 5.10), sept scénarios ont été générés, dont trois représentent des conséquences néfastes. En conséquence, après avoir comparé des deux arbres, nous constatons que les scénarios de sécurité ont été augmentés.

5.3.1.2. L'effet sur l'environnement du bac

Pour vérifier l'influence de vidange sur l'environnement du bac, nous avons utilisé le logiciel ALOHA qui modélise les zones de danger. Les graphes représentés sur le tableau 5.6 montrent la variation de l'effet toxique et thermique en fonction des différents taux de vidange du bac de stockage.

Tableau 5.6 : Zones de danger par l'effet toxique et thermique illustré par ALOHA

Taux de vidange (%)	zones toxiques résultant de la dispersion du nuage de vapeur	zones inflammables du nuage de vapeur
17%	<p> kilometers 1.5 0.5 0 0.5 1.5 1 0 1 2 3 4 kilometers greater than 4000 ppm (AEGL-3 [60 min]) greater than 800 ppm (AEGL-2 [60 min]) greater than 52 ppm (AEGL-1 [60 min]) --- wind direction confidence lines </p>	<p> meters 200 100 0 100 200 100 0 100 200 300 400 meters greater than 7200 ppm (60% LEL = Flame Pockets) greater than 1200 ppm (10% LEL) --- wind direction confidence lines </p>
27%	<p> kilometers 1.5 0.5 0 0.5 1.5 1 0 1 2 3 kilometers greater than 4000 ppm (AEGL-3 [60 min]) greater than 800 ppm (AEGL-2 [60 min]) greater than 52 ppm (AEGL-1 [60 min]) --- wind direction confidence lines </p>	<p> meters 200 100 0 100 200 100 0 100 200 300 400 meters greater than 7200 ppm (60% LEL = Flame Pockets) greater than 1200 ppm (10% LEL) --- wind direction confidence lines </p>
37%	<p> kilometers 0.75 0.25 0 0.25 0.75 0.5 0 0.5 1 1.5 kilometers greater than 4000 ppm (AEGL-3 [60 min]) greater than 800 ppm (AEGL-2 [60 min]) greater than 52 ppm (AEGL-1 [60 min]) --- wind direction confidence lines </p>	<p> meters 100 50 0 50 100 50 0 50 100 150 200 meters greater than 7200 ppm (60% LEL = Flame Pockets) (nc) greater than 1200 ppm (10% LEL) --- wind direction confidence lines </p>
47%	<p> kilometers 0.75 0.25 0 0.25 0.75 0.5 0 0.5 1 1.5 kilometers greater than 4000 ppm (AEGL-3 [60 min]) greater than 800 ppm (AEGL-2 [60 min]) greater than 52 ppm (AEGL-1 [60 min]) --- wind direction confidence lines </p>	<p> meters 100 50 0 50 100 50 0 50 100 150 200 meters greater than 7200 ppm (60% LEL = Flame Pockets) (nc) greater than 1200 ppm (10% LEL) --- wind direction confidence lines </p>



Où:

- AEGL-3 (zone rouge) (Acute Exposure Guideline Level : niveau indicatif d'exposition aiguë) est la zone à risque de mortalité et d'effets potentiellement mortels en fonction du temps d'exposition;

- AEGL-2 (zone orange) est une zone à moindre risque que la zone AEGL-3, mais pourrait développer des effets graves à long terme sur la santé ou irréversibles ;
- AEGL-1 (zone jaune) est le domaine des effets d'inconfort (O'Mahony et al., 2008).

Les tableaux ci-dessous (5.7 et 5.8) résument les dangers de l'effet toxique et l'effet thermique en fonction du taux de vidange du réservoir.

Tableau 5.7 : Les distances des zones de danger toxique en fonction du taux de vidange

Taux de vidange (%)	17	27	37	47	57	67	77	87
Zone rouge (m)	139	123	66	59	59	59	59	59
Zone orange(m)	434	230	208	207	207	207	207	207
Zone jaune(m)	3000	2700	1500	1400	1400	1400	1400	1400

Tableau 5.8 : Les distances des zones de danger d'effet thermique en fonction du taux de vidange

Taux de vidange (%)	17	27	37	47	57	67	77	87
Zone rouge (m)	70	56	23	25	25	25	25	25
Zone jaune(m)	367	326	172	156	155	155	155	155

Graphiquement nous pouvons illustrer ses variations sur les figures 5.11 et 5.12 respectivement.

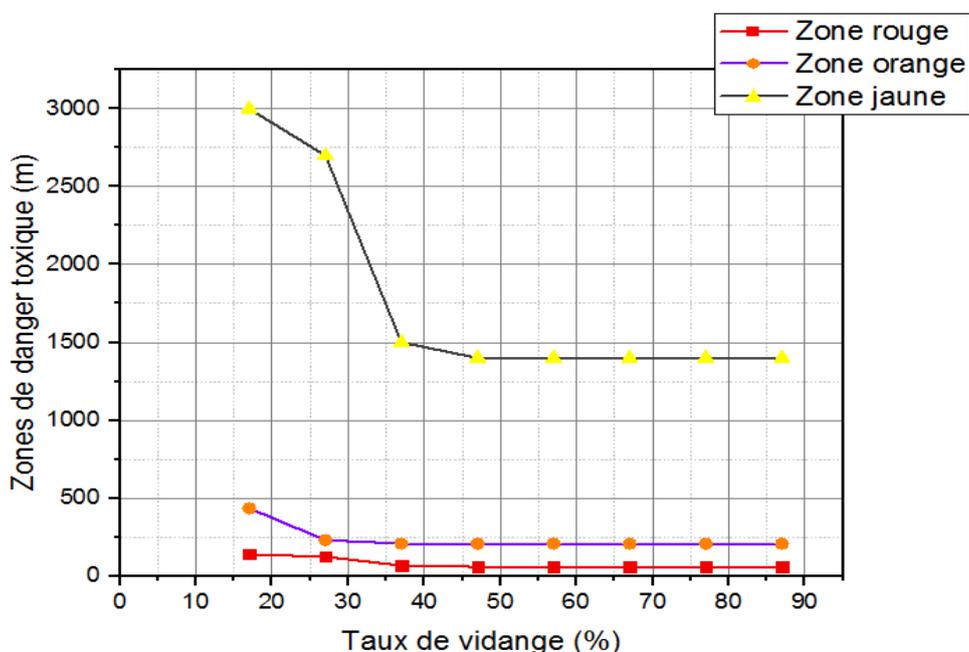


Figure 5.11 : Distances des zones de danger toxique en fonction du taux de vidange

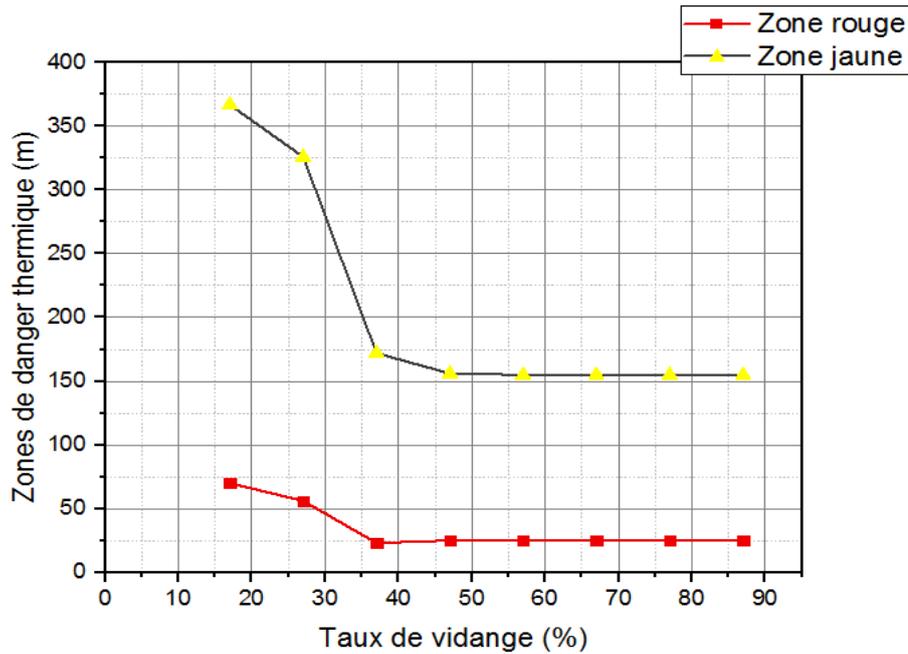


Figure 5.12 : Distance des zones de danger d'effet thermique en fonction du taux de vidange

Les courbes des figures 5.11 et 5.12 indiquent une contraction importante dans les zones dangereuses telles que:

- Zones dangereuses de gaz toxiques:

Une contraction a été observée dans la zone jaune AEGL-1 de 53,34%, où elle était de l'ordre de 3000 m lorsque le bac était vidé à 17%, elle devenait de 1400 m à 87% du volume de drainage produit par le réservoir.

Alors que la réduction de la zone orange AEGL-2 a été estimée à 57, 5% et 58% pour la région à plus haut risque (zone rouge AEGL-3), on peut remarquer que pour les trois zones, la propagation des gaz toxiques sera réduite à plus de 50%, et une fois que le vidange dépasse 47% du liquide stocké, nous constatons que le taux de réduction est stabilisé.

- Zones dangereuses d'effets thermiques:

Dans la zone jaune, la moins dangereuse, une contraction significative peut être remarquée dans cette zone de 57,77% où elle s'étendait sur 367 m lorsque le réservoir a été vidé à 17% et elle était réduite à 155 m lorsque le réservoir a été vidé à 87%.

Alors que la zone rouge, la plus dangereuse, a connu un rétrécissement de 64, 29%; ainsi, la contraction dans la zone de danger thermique était supérieure à 50% et la stabilisation au-delà 47% de vidange.

Ces résultats ont mis en évidence que les zones de danger étaient proportionnelles au volume du produit dans le réservoir. Ainsi, s'il y avait une grande quantité de produit dans le

réservoir, les zones de danger seront plus grandes et l'effet sera plus dangereux. Donc, s'il y avait moins de produits, les zones seront réduites, de sorte que le drainage, dans ce cas, a un rôle important, même s'il ne l'est que partiellement.

5.3.1.3. L'effet sur le bac

Cette étape est basée sur l'étude statique par la simulation, où le modèle des bacs utilisé dans cette étude est un bac aérien à toit fixe, un maillage structuré (cellules trigonométriques) a été utilisé pour l'ensemble du bac, le modèle a 5756 éléments (figure 5.13).

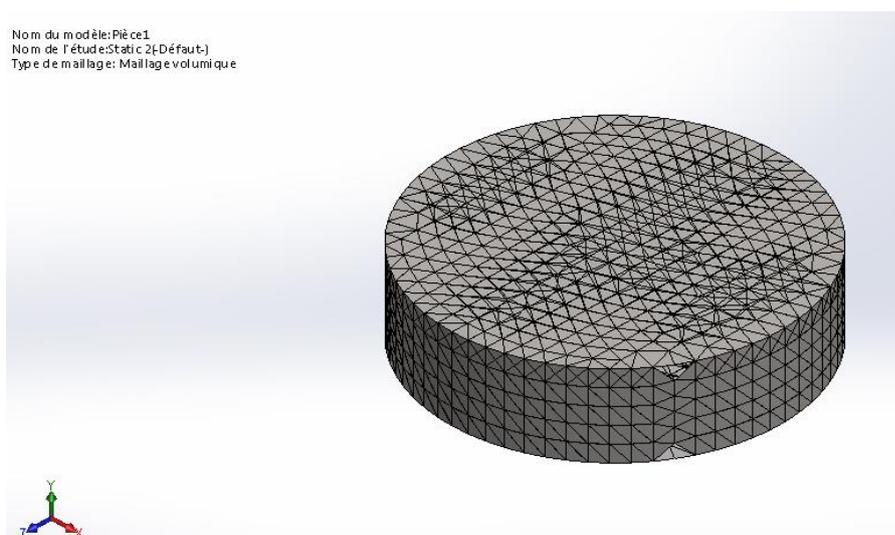


Figure 5.13 : Le maillage de bac utilisé

- **Cas 1:** Les figures 5.14, 5.15 et 5.16 montrent l'étude statique du réservoir en état critique.

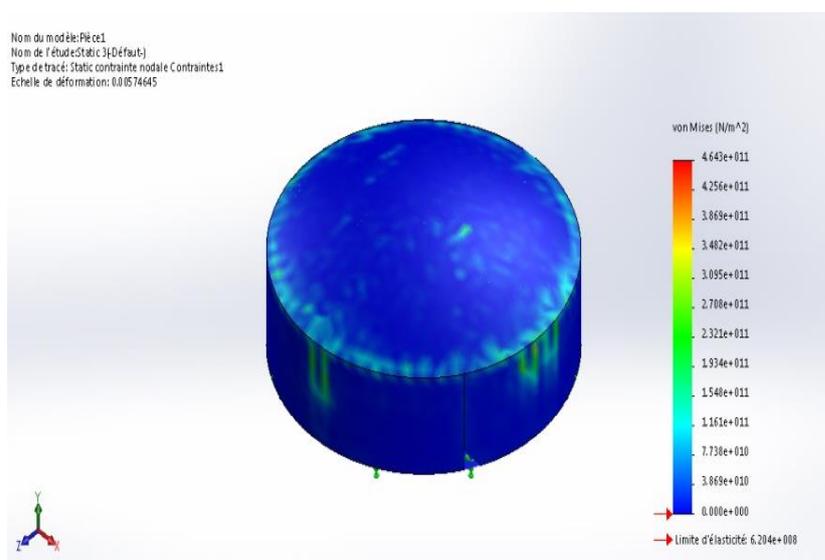


Figure 5.14 : La contrainte du le réservoir à l'état critique

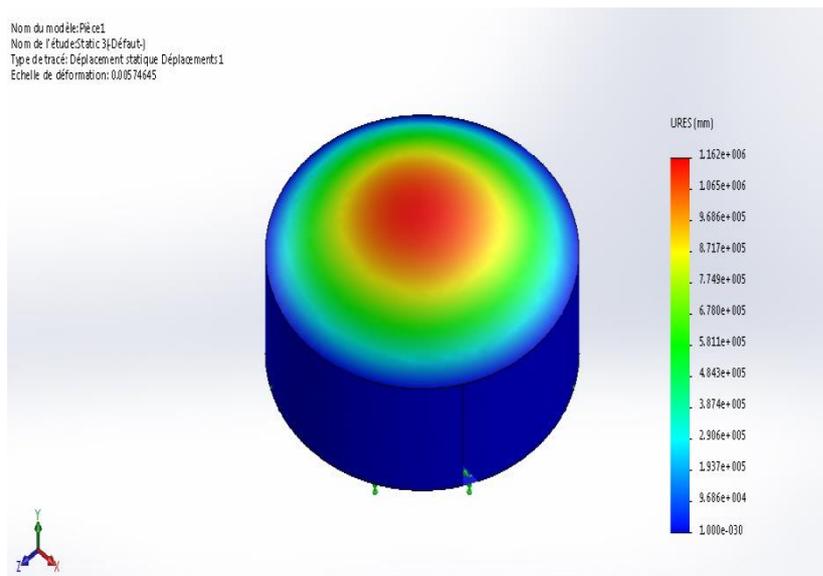


Figure 5.15 : Déplacements du réservoir à l'état critique

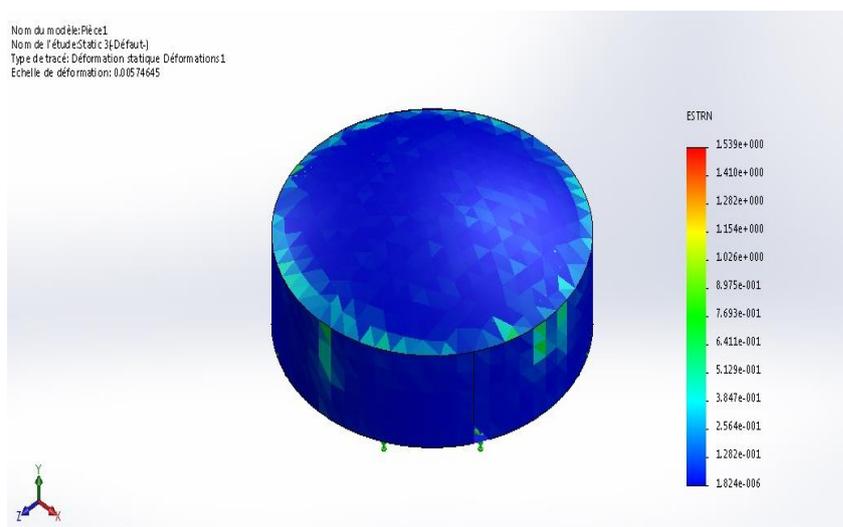


Figure 5.16 : Déformation exercée sur le réservoir à l'état critique

Les valeurs maximales et minimales de contrainte, déplacement et déformation du cas critique ont été regroupées dans le tableau 5.9.

Tableau 5.9 : Les valeurs maximales et minimales du cas critique

	contrainte (N/m ²)		déplacement (mm)		déformation	
	corps	toit	corps	toit	corps	toit
valeurs maximales	4.643*10 ¹¹	1.788*10 ¹¹	2.461*10 ³	1.162*10 ⁶	6.864*10 ⁻¹	6.125*10 ⁻¹
valeurs minimales	2.030*10 ⁸	4.804*10 ⁸	10 ⁻³⁰	39.98	9.474*10 ⁻⁴	1.861*10 ⁻³

D'après les résultats obtenus, il est noté que la valeur maximale de la contrainte sur le réservoir ($4,643 \cdot 10^{11}$ N / m²) est grande par rapport à la limite d'élasticité $6,204 \cdot 10^8$ N / m²,

ce qui signifie que le réservoir est dans un état non sûr et qu'il peut être entré dans la gamme plastique.

Par ailleurs, il est à noter que les déplacements représentés sur les figures 5.15 montrent clairement que le toit du réservoir est la partie la plus vulnérable et que les valeurs maximales étaient de l'ordre [m] ce qui signifie que ces déplacements peuvent être irréversibles comme le cas de l'explosion d'un réservoir.

Il convient de noter que les valeurs de déformation étaient comprises entre $9,474 \cdot 10^{-4}$ et $6,864 \cdot 10^{-1}$ en tant que valeur maximale.

- **Cas 2:** les figures 5.17, 5.18 et 5.19 montrent l'étude statique du bac à l'état d'ébullition.

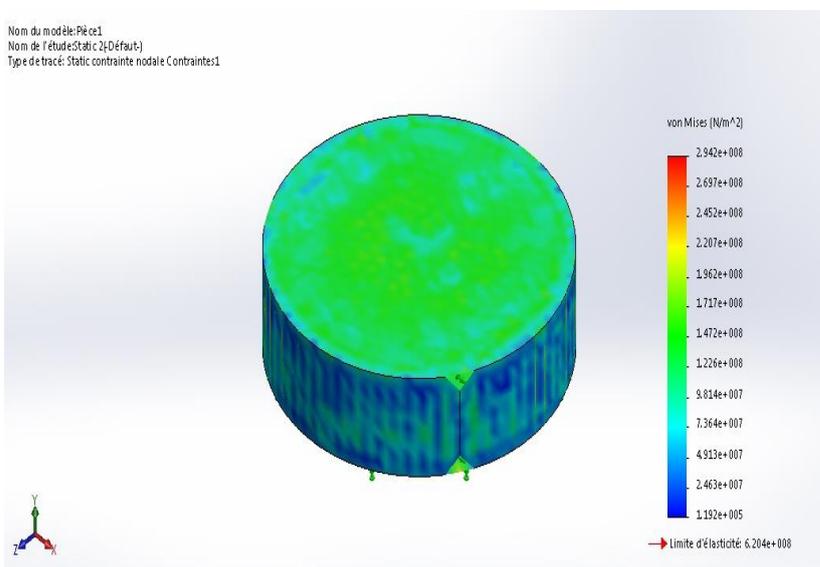


Figure 5.17 : La contrainte du le réservoir à l'état d'ébullition

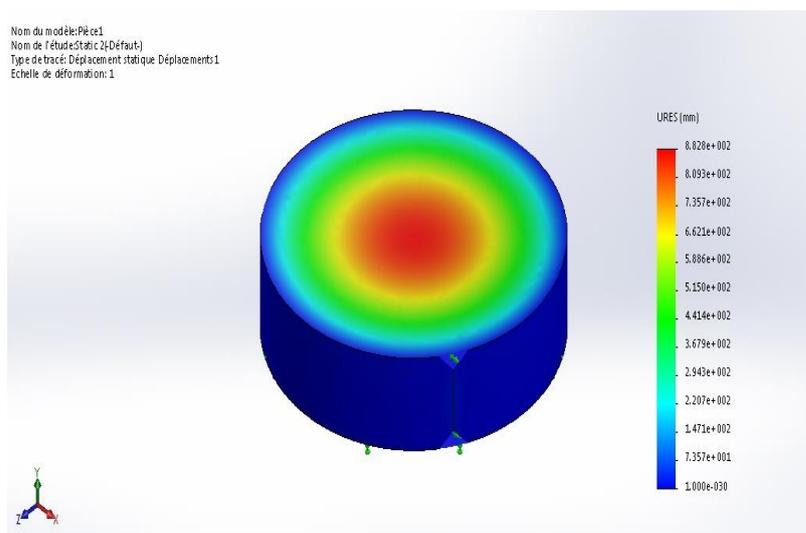


Figure 5.18 : Déplacements du réservoir à l'état d'ébullition

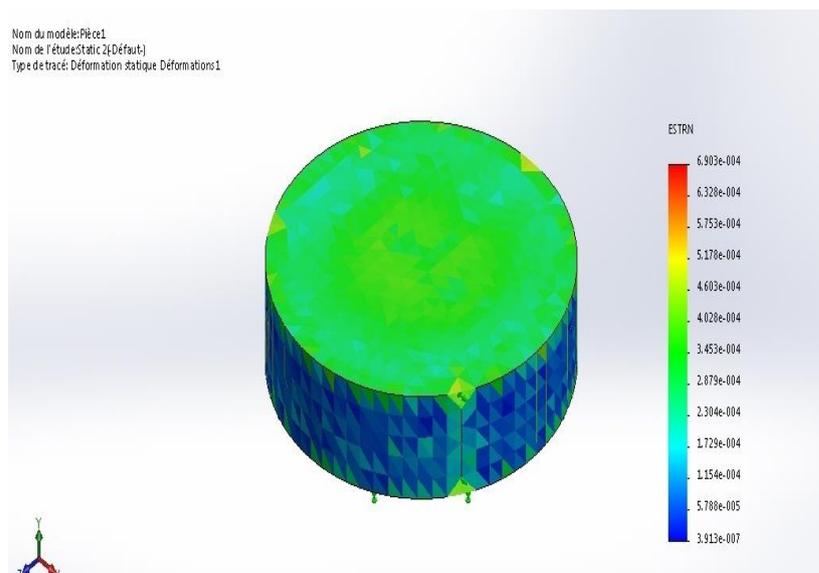


Figure 5.19 : Déformation exercée sur le réservoir à l'état d'ébullition

Les valeurs maximales et minimales de contrainte, déplacement et déformation ont été regroupées dans le tableau 5.10 (cas d'ébullition)

Tableau 5.10 : Les valeurs maximales et minimales du cas d'ébullition

	contrainte (N/m ²)		déplacement (mm)		déformation	
	corps	toit	corps	toit	corps	toit
valeurs maximales	1.445*10 ⁸	1.724*10 ⁸	22.18	8.827*10 ²	4.355*10 ⁻⁴	4.355*10 ⁻⁴
valeurs minimales	5.105*10 ⁶	2.804*10 ⁷	10 ⁻³⁰	6.308	1.923*10 ⁻⁵	1.923*10 ⁻⁵

Comme illustré sur la figure 5.17 et le tableau 5.11, la valeur maximale de la contrainte sur le réservoir ($1,445 \times 10^8$ N / m²) est faible par rapport à la limite d'élasticité ce qui signifie qu'elle est loin du domaine plastique. Nous constatons que le déplacement est de l'ordre de millimètre [mm] pour qu'il résiste au chargement appliqué (figure 5.18). De plus, la déformation était comprise entre $1,923 \times 10^{-5}$ et $4,355 \times 10^{-4}$.

Basé sur la comparaison de deux cas (critique et ébullition) a révélé que le premier cas de bac dans un état délicat que l'autre, de sorte qu'on trouve que si le réservoir n'est pas vidé au bon moment, il peut fausser une déformation irréversible.

5.3.2. Choix et présentation de modèle de vidange proposé

5.3.2.1. Choix d'orifice

Après l'application de la formule de Torricelli pour trouver le rayon d'orifice correspond au modèle proposé de vidange. Le tableau 5.11 indique le temps de vidange du

réservoir de stockage et le débit du liquide vidé pour chacun des rayons allant de 0,1 à 1 mètre ; où la figure 5.20 démontre la relation entre le temps et le rayon de vidange.

Tableau 5.11 : temps et débit de vidange en fonction de rayon d'orifice

r(m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
t (min)	3109,285	777,321	345,476	194,33	124,371	86,369	63,454	48,582	38,386	31,092
Q (m ³ /s)	0.267	1.069	2.406	4.277	6.684	9.625	13.100	17.111	21.656	26.733

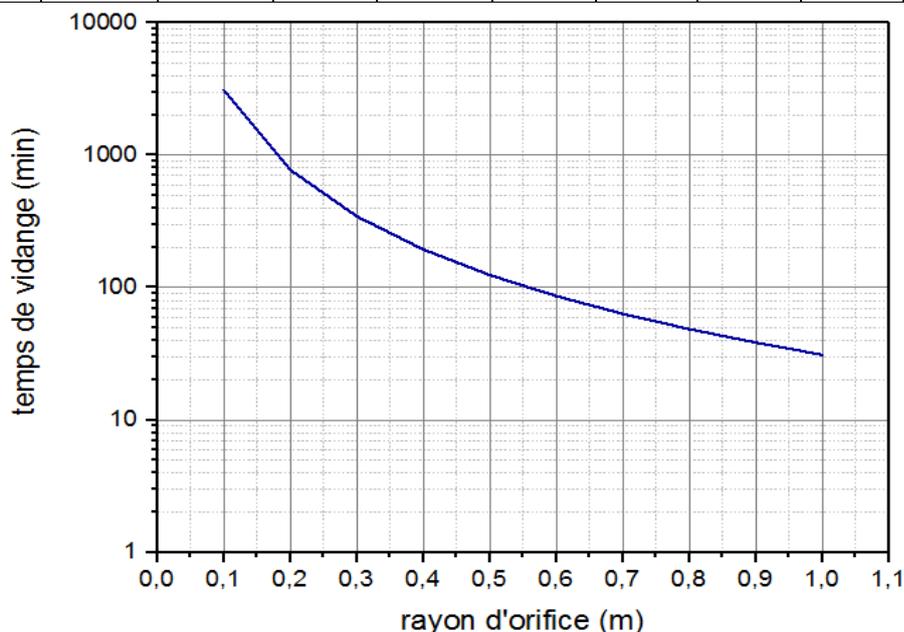


Figure 5.20 : Temps de vidange du bac en fonction du rayon d'orifice

En se reportant à la figure 5.20, nous pouvons constater que si le rayon de l'orifice de vidange est plus grand, le temps de vidange est plus court. L'augmentation du rayon de 0.1m à 1m c'est-à-dire 10 fois plus grand, signifie une réduction du temps de vidange allant de 51.82h à 0.5h, ce qui représente une réduction de 102fois le temps.

Pour notre cas et pour des considérations techniques, nous allons travailler par un orifice de rayon $r= 0.5m$, cela représente 2.07h comme temps de vidange.

5.3.2.2. Proposition d'un modèle de vidange

Ce modèle est composé de trois parties (figure 5.21 et 5.22). La première est représentée par une pipe linéaire inclinée d'une longueur de 100 m. La seconde est un tuyau d'enroulement connecté au premier qui assure un mouvement en douceur et un accès fluide à la cuvette de rétention. Et en fin, une cuvette de rétention en forme d'un bac souterrain. Ce modèle présente les caractéristiques indiquées dans le (tableau 5.12).

Tableau 5.12 : Caractéristiques du modèle proposé

Partie	Caractéristiques	
1. pipe linéaire	rayon (m)	0.5
	Longueur (m)	100
	Angle d'inclinaison	10°
2. pipe enroulée	Nombre de roulement	3.5
	hauteur (m)	40
	rayon (m)	20
3. Bassin de rétention	rayon (m)	22
	hauteur (m)	44

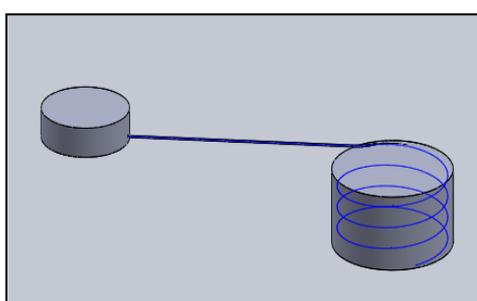


Figure 5.21 : Démonstration du modèle proposé

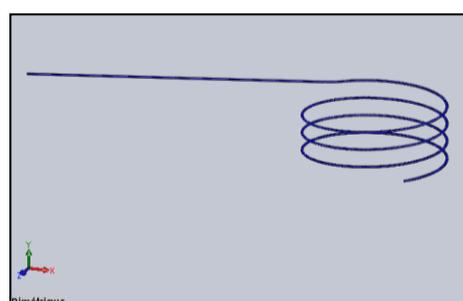


Figure 5.22 : Démonstration de modèle de pipeline.

5.3.3. Vérification de modèle proposé

Pour vérifier le modèle proposé en simulant l'effet de l'écoulement du fluide à sa température à l'aide de code flow simulation de SOLIDWORKS, il doit y avoir un repère pour rendre le jugement facile ; pour cela nous avons mené une étude de l'écoulement de fluide avec les conditions aux limites de deux états dangereux de benzène 'critique et d'ébullition' (tableau 5.13), pour les deux (02) modèles : le simple (modèle1) qui est avec une motopompe (avec rayon de pipeline de vidange est 0.5m, la longueur de pipeline est 100m) et l'amélioré (modèle2).

Tableau 5.13 : conditions aux limites de simulation

modèle	État	Pression de fluide (n/m ²)	Température de fluide (k)	Température de solide (k)	Valeur de débit m ³ /s	Limite de débit
Modèle 1	critique	4893000	562.1	293	4.4	pipe entier
	ébullition	101325	353.3	293	4.4	pipe entier
Modèle 2	critique	4893000	562.1	293	Variable (Tableau 5.7)	à l'entrer de pipe
	ébullition	101325	353,3	293	Variable (Tableau 5.7)	à l'entrer de pipe

Le modèle proposé n'assure pas une valeur fixe de débit à l'entré de pipeline, car il n'est pas alimenté par une motopompe. Pour cela nous avons utilisé l'équation 5.17 pour

calculer chaque valeur de débit qui correspond à un instant donnée et à la hauteur de liquide. Le tableau 5.14 est montré ces valeurs de débit.

Tableau 5.14 : les valeurs de débit correspond au temps à l'entrée de modèle proposé

Hauteur (m)	Temps (s)	Débit (m ³ /s)	Hauteur (m)	Temps (s)	Débit (m ³ /s)
14,00	0	6,68	6,72	2314,4	4,50
13,72	75,7	6,44	6,44	2424,3	4,41
13,44	152,2	6,37	6,16	2536,6	4,31
13,16	229,5	6,30	5,88	2651,5	4,21
12,88	307,6	6,24	5,60	2769,2	4,11
12,60	386,6	6,17	5,32	2889,8	4,01
12,32	466,5	6,10	5,04	3013,7	3,90
12,04	547,3	6,03	4,76	3141	3,79
11,76	629	5,96	4,48	3272,2	3,67
11,48	711,7	5,89	4,20	3407,5	3,56
11,20	795,4	5,81	3,92	3547,5	3,44
10,92	880,2	5,74	3,64	3692,5	3,31
10,64	966	5,67	3,36	3843,2	3,18
10,36	1053	5,59	3,08	4000,3	3,05
10,08	1141,2	5,52	2,80	4164,8	2,90
9,80	1230,6	5,44	2,52	4337,7	2,75
9,52	1321,3	5,36	2,24	4520,5	2,60
9,24	1413,4	5,28	1,96	4715,2	2,43
8,96	1506,8	5,20	1,68	4924,3	2,25
8,68	1601,8	5,12	1,40	5151,7	2,05
8,40	1698,2	5,03	1,12	5403,2	1,83
8,12	1796,3	4,95	0,84	5688,7	1,59
7,84	1896,1	4,86	0,56	6027,4	1,30
7,56	1997,7	4,78	0,28	6468,7	0,91
7,28	2101,2	4,69	0	7462,2	0
7,00	2206,7	4,59			

➤ **Modèle simple (modèle 1)**

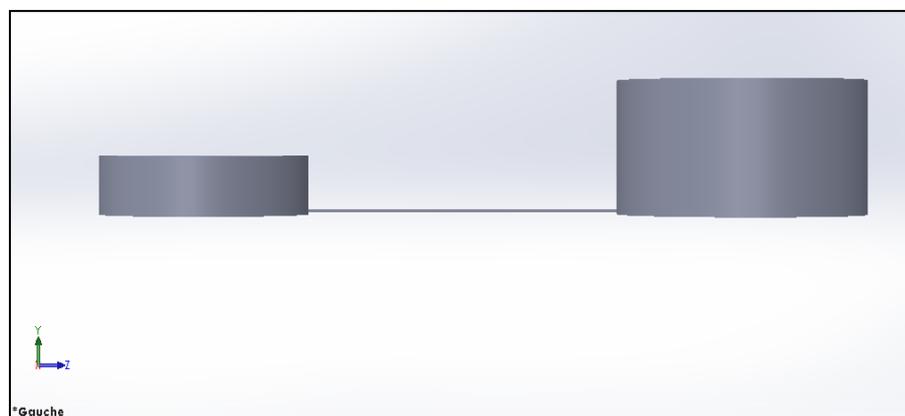


Figure 5.23 : Schématisation de modèle simple (modèle 1)

Le profil de température du fluide dans le pipeline a été représenté sur la figure 5.24.

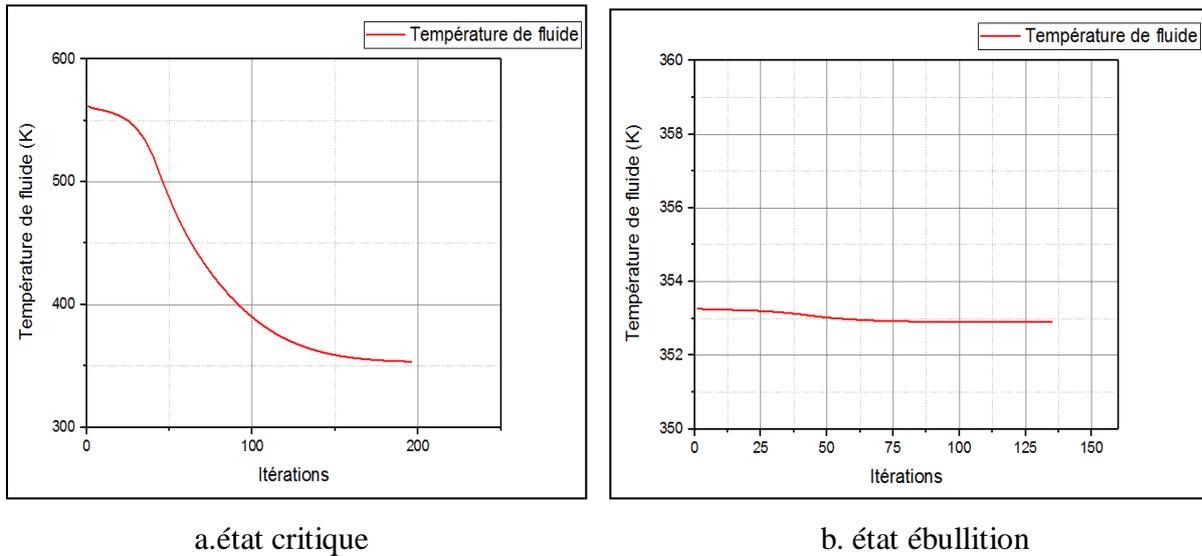


Figure 5.24 : Courbes de suivi de la température du benzène dans le modèle simple (modèle 1)

La figure 5.24 représente la variation de température de fluide durant le vidange avec l'ancien modèle qui est enchainé avec une motopompe de débit $0.38 \text{ m}^3/\text{s}$,

Nous avons observé de la figure 5.24.a que la température du fluide est diminuée de 76, 3%. Cette température a commencé avec la température critique de 562.1 K, mais elle est arrivée aux 353,59 k, qui est une valeur au delà de l'état d'ébullition.

Pour le 2ème cas (l'ébullition), nous avons trouvé de la figure 5.24.b que la température du fluide est légèrement réduite de 0,31%. Cette réduction de l'état initial 353,3K au point final (le bac de réception) 352,8 K est insuffisante (0,5 degré), ce qui confirme que ce modèle de drainage peut aggraver la situation et peut grandir les zones des dangers par le transmettre le phénomène dangereux, en plus l'effet de vidange accéléré par les motopompes peut déformer le bac de stockage par l'effet de sous-pression (Li et al., 2018).

➤ **Modèle proposé (modèle 2)**

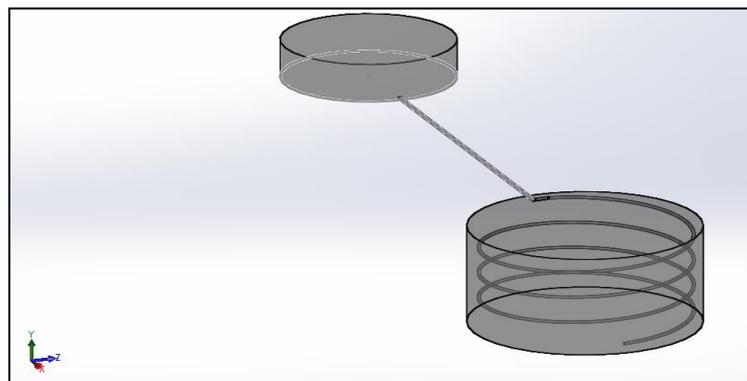
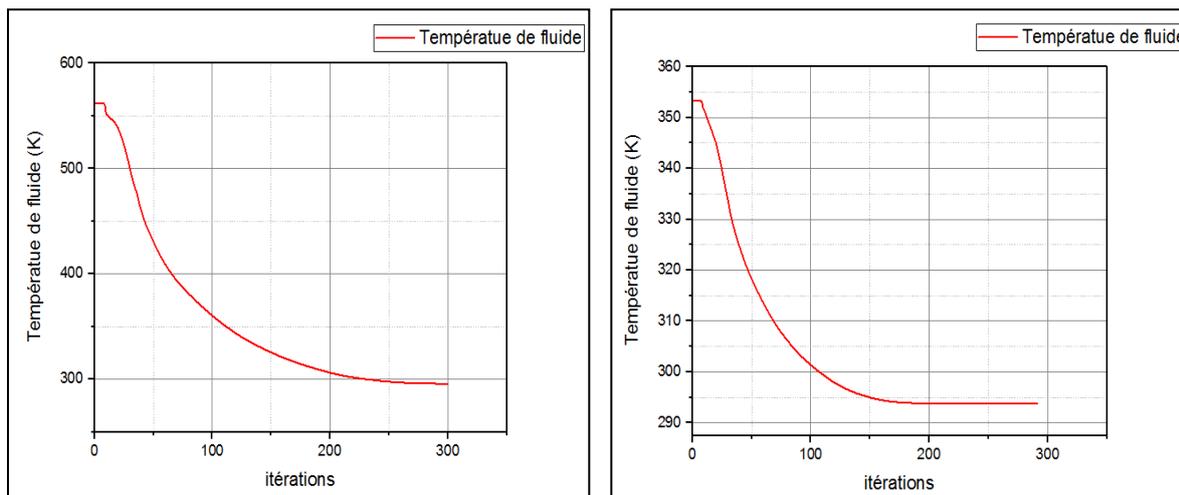


Figure 5.25 : Schématisation du modèle de vidange proposé (modèle 2)

Le profil de température du fluide dans le pipeline a été représenté sur la figure 5.26.



a. état critique
b. état ébullition
Figure 5.26 : Courbes de suivi de la température du benzène dans le modèle proposé (modèle 2)

La figure 5.26 démontre le profil de température du fluide dans la pipe de modèle proposé, où d'après la figure 5.26.a de cas critique, nous avons observé que le produit est entré dans la pipe avec une température de 562,1 k et sorti avec une température de 295,77k ; donc cette réduction est de 98,40%.

Dans le cas d'ébullition (figure 5.26.b), nous avons constaté que la température du fluide est réduite de 99,66 %. Cette température a commencé avec la température d'ébullition de 353,3K, mais elle a diminué pendant le déplacement du liquide à travers le pipeline jusqu'à la stabilisation (293,75 k) près de la température ambiante qui a été supposé de 293,2K.

Cela confirme que ce modèle de drainage permet d'abaisser la température du produit avec la convection libre et de le transporter en toute sécurité.

Après les 2 simulations, nous remarquons que le nouveau modèle est plus fiable que l'ancien sachant que le phénomène dangereux ne déplace pas avec la vidange et la situation être mieux contrôlé surtout en face des phénomènes prévisibles et qui donnent le temps pour prendre la décision comme le BOILOVER. Pour cela, dans le tableau suivant nous avons regroupé les avantages et les convenions de chaque modèle.

Tableau 5. 15 : Comparaison des modèles de rétention

modèle	avantages	inconvénients
cuvette ouverte	<ul style="list-style-type: none"> - Réparation rapide et moins coûteuse - Installation légèrement moins coûteuse 	<ul style="list-style-type: none"> - Pert de produit - Peut provoquer l'incendie - Peut transporter l'incendie - Feu de nappe probable
Vidange avec motopompe	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance moins coûteuse - Installation légèrement moins coûteuse - Temps de vidange réduit 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'énergie électrique - Provoque l'incendie par étincelle d'origine électrique - Procédure compliquée - Feu de jet probable
Vidange améliorée	<ul style="list-style-type: none"> - Ne nécessite aucun espace en surface - Réservoirs protégés des intempéries - Faibles risques d'incendie - Ne nécessite pas de contrôle des émissions de composés organiques volatils -Perte de température du produit par convection libre - Ne nécessite aucune énergie - Temps de vidange étudier 	<ul style="list-style-type: none"> - Réparation plus difficile et couteuse. -Excavation importante requise lors de l'installation - Risques de corrosion plus élevés pour les réservoirs en acier - Possibilités d'émissions et de corrosion non détectées

5.4. Conclusion

Ce chapitre a introduit une amélioration du système de sécurité du réservoir de stockage en proposant de renforcer les barrières techniques de sécurité. Un bassin de rétention à distance a été ajouté au système avec son modèle de pipeline. Sur la base des résultats obtenus, la barrière proposée a un effet positif sur le système de sécurité d'un bac de stockage.

En conséquence, le taux de sécurité augmente après l'ajout de la nouvelle barrière, comme l'ont confirmé l'étude de l'arbre des événements et la modélisation ALOHA. De plus, les dommages au réservoir sont réduits, en particulier sur le toit, qui est au point le plus vulnérable. Selon l'étude statique, la diminution de la contrainte, du déplacement et de la déformation, nous avons constaté que la plupart des points du toit n'étaient pas déformés par la déformation plastique.

En revanche, le modèle proposé a un effet sur la température du fluide transporté. Dès que le fluide est libéré dans le tuyau, il commence à perdre de la température par convection libre et atteint le bassin de rétention distant en toute sécurité.

Pour conclure, ces résultats sont d'une importance majeure dans les systèmes de sécurité de l'industrie pétrolière, en particulier les risques majeurs liés au stockage d'hydrocarbures tel que l'incendie et les fuites et même en cas d'effet de domino.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Il est clairement fondamental que la protection de l'environnement de travail reste un élément central de tout organisme, en particulier les hydrocarbures. De ce fait, toute entreprise quelle que soit son activité et sa taille doit s'engager à adopter des mesures proactives pour sa pérennité et la préservation de la sécurité et l'environnement. Il est donc nécessaire de disposer de moyens qui permettent de comprendre, de prévenir, d'anticiper et de réagir à tous accidents, voire garantir la sécurité des employés, des installations et de la communauté au sens le plus large. Pour cela, il est nécessaire d'identifier les problèmes les plus importants et essentiels à la gestion sécurisée des installations et produits manipulés et de les comprendre le mieux possible. Ainsi, et afin d'éviter de tels phénomènes dangereux de se manifestés au sein des installations et outils de production, les industriels sont amenés à mettre en place des mesures de maîtrise des risques, *les systèmes de sécurité*, dont le rôle est de prévenir l'apparition de tels phénomènes ou d'en limiter les conséquences.

Le système de sécurité se compose généralement de plusieurs barrières interconnectées et complémentaires, ces barrières diffèrent en termes de fonctions et ont le même objectif de maintenir l'intégrité du système cible, que ce soit par la prévention, la protection ou la surveillance. De ce fait, le système de sécurité est généralement présent dans tout système industriel et en particulier les industries à haut risque, bien entendu, le système de stockage d'hydrocarbures ne fait pas l'exception. Désormais, le stockage des produits hydrocarbonés est extrêmement sensible aux risques qui l'accompagnent. Les accidents liés à ce mécanisme font partie des accidents les plus dangereux du secteur industriel en raison de l'étendue de zone de danger et du grandiose des pertes qui en résultent (Dégâts corporels, matériels et environnementaux). Par conséquent, le développement et la mise à niveau du système de sécurité des réservoirs de stockage sont d'une grande importance pour éviter ces types de risques, objectif de cette recherche.

Ainsi, pour atteindre les objectifs souhaités de cette recherche et en raison contraintes d'expérimentation réelle et des difficultés auxquelles nous sommes confrontés dans la mise en œuvre de nos perspectives sur le terrain, nous avons fait appel à de

nombreux outils pour nous ajuster à l'approche expérimentale, à savoir : SADT, BORA, arbre des conséquences, ALOHA et SolidWorks, dans un ordre consécutif suivant:

- Critique du système de sécurité actuellement utilisé en Algérie ;
- Clarification du rôle du facteur humain dans le système de sécurité exploité dans les entreprises algériennes ;
- Détermination de la relation entre l'amélioration contenue des législations algériennes et le nombre des accidents des entreprises algériennes et sa gravité;
- L'Étude de l'effet de la décharge à divers niveaux ;
- Proposition d'un nouveau modèle permettant de développer et d'améliorer les performances du système de sécurité actuel ;
- Validation du modèle proposé.

Comme résultat de recherche, nous pouvons conclure que le système de sécurité utilisé dans les entreprises algériennes actuel nécessite une attention particulière et une révision générale touchant le système de détection, le système de supervision ou le facteur humain, le système de refroidissement, le système de drainage et le système d'extinction d'incendie. Ces barrières assurent les fonctions suivantes: surveillance, détection et alarme de température, abaissement automatique et manuel de la température, vidange du produit si nécessaire et suppression des incendies. La moindre défaillance de ces barrières peut provoquer un accident.

Les résultats ont montré aussi que le facteur humain joue un rôle fondamental dans le succès ou la dérive de celui-ci et contribue au niveau de toutes les parties du système et que l'erreur humaine peut être à l'origine de la plupart des défauts des composants. Par conséquent, les auteurs recommandent que la formation, l'information, la sensibilisation, la motivation et les conseils préventifs du personnel, notamment sur les dangers, les risques et la sécurité d'utilisation, soient renforcés dans un cadre indépendant.

Nous avons trouvé aussi que les textes réglementaires algériens d'hydrocarbures, d'environnement et de la sécurité consistent des définitions des termes, des accords internationaux, des textes motivants, réglementaires et punitifs. Nous avons remarqué aussi que l'amélioration contenue de ces textes réglementaires influe sur les accidents survenus au sein des entreprises algériennes en termes ses nombre et gravité. Cependant, il existe

des lacunes nombreuses dans ces textes qui doivent être comblées en recourant aux normes internationales.

Sur la base des résultats, une attention particulière a été apportée à la barrière de vidange, où nous avons étudié son effet sur le système de sécurité sujet, l'environnement du bac et le réservoir lui-même. Enfin, nous avons proposé un modèle développé pour le processus de vidange. L'originalité de ce modèle réside dans l'utilisation de la loi universelle de la gravitation pour vider le bac principal dans un autre réservoir souterrain considéré comme cuvette éloignée sans aucune énergie supplémentaire. Cela permet de garantir l'évacuation en douceur et en toute sécurité du liquide stocké.

Nous avons observé aussi après l'ajout de la barrière drainante une augmentation du rapport de sécurité, diminution des zones de danger et réduction des dommages appliqués au réservoir, notamment sur le toit, qui est la partie la plus vulnérable.

Le modèle proposé dans notre étude a un effet sur la température du fluide transporté. Dès que le fluide est libéré dans le tuyau, qui perd sa température par convection libre et atteint le bassin de rétention à distance en toute sécurité dans un temps de vidange étudié.

Cependant, il faut reconnaître que dans notre thèse, nous avons utilisé un seul produit (le benzène), point faible de notre travail. Nous n'avons pas pu vérifier les résultats du reste des produits hydrocarbonés. Faute de quoi, le développement de notre étude ne touche qu'une partie du système global. De plus, il faut aussi rappeler que l'étude n'a pas abordé l'aspect financier et les coûts de ce développement en raison du manque d'information sur ce sujet, qui bifurque notre étude.

À l'issue de cette thèse, bien que les résultats obtenus soient encourageants, ils peuvent être considérés comme une première étape. Il serait intéressant dans des études futures d'ouvrir la voie à un certain nombre d'études qui peuvent traiter le développement de système de sécurité des bacs de stockage d'autres manières ou en portant attention à une autre partie de système. D'autres produits peuvent également être vérifiés dans notre modèle suggéré, étudier leurs réactions à une autre décharge ainsi que la différence entre leurs réactions.

Pour terminer, nous recommandons les pratiques suivantes :

- Renforcer l'information préventive, la sensibilisation, l'éducation environnementale et la participation aux mesures de protection de l'environnement ;
- Signaler toute forme de dysfonctionnement de l'outil de production pouvant causer de nuisance ou pollution à l'environnement ;
- Disposez d'un service de maintenance qualifié, des outils de maintenance et de surveillance adéquate à la technologie utilisée ;
- D'être vigilant et attentif pour signaler toute anomalie pouvant faire disparaître l'entité en quelques secondes !

Bibliographie

Bibliographie

- Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., Pasdarsahri, H., Mahabadi, H. A., & Sarvestani, K. (2019). Modeling of boilover phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations. *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 25–39.
- Albrecht, A., Grondin, O., Le Berr, F., & Le Sollic, G. (2007). Towards a stronger simulation support for engine control design: a methodological point of view. *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP*, 62(4), 437–456.
- Ali, A. S., Kamaruzzaman, S. N., & Sing, G. C. (2010). A Study On Causes Of Accident And Prevention In Malaysian Construction Industry. *Journal of Design + Build*, 3(3), 95–113.
- Alimohammadi, I., Nourai, F., Daryalaal, M. J., & Ghasemi, A. M. (2014). A novel method to design water spray cooling system to protect floating roof atmospheric storage tanks against fires. *Iranian Journal of Health, Safety & Environment*, 2(1), 235–242.
- Almannai, B., Greenough, R., & Kay, J. (2008). A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(4), 501–507.
- Andersen, H., Casal, J., Dandrieux, A., Debray, B., De Dianous, V., Duijm, N. J., Delvosalle, C., Fievez, C., Goossens, L., & Gowland, R. T. (2004). ARAMIS user guide. *EC Contract Number EVG1-CT-2001-00036*.
- Arnault, J. (2018). *Formulation de nouvelles mousses d'extinction d'incendie avec impact réduit sur environnement*. Lyon.
- Arrêté du 09 /11/72. (1972). *relatif à l'aménagement et l'exploitation de dépôts d'hydrocarbures liquéfiés (Abrogé)*. AIDA.
- Bacha, S., Chaib, R., & BELLAOUAR, A. (2021). CONTRIBUTION TO THE DETERMINATION OF THE SILs REQUIRED FOR THE SAFETY OF PETROLEUM INSTALLATIONS: CASE STUDY OF THE PROPANE STORAGE TANK (BALLOON). *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS*, 64(2), 293–304.
- Bahar, R., Sadaoui, O., & Khiatine, M. (2011). Comportement des fondations d'ouvrages sur les sols mous de Béjaia renforcés par des colonnes ballastées. *2ème Séminaire International Innovation et Valorisation Dans Le Génie Civil, INVACO2*.
- Baker, W. E., Cox, P. A., Kulesz, J. J., Strehlow, R. A., & Westine, P. S. (2012). *Explosion hazards and evaluation*. Elsevier.
- Bento, J. P. (2003). Review from an MTO-perspective of five investigation reports from BP (Draft). *Norway: Stavanger*.
- Billard, E. (2015). *Etude des communautés microbiennes fonctionnelles benthiques impliquées*

dans le cycle du méthane (Lac du Bourget). Université Grenoble Alpes.

Bogue, R. (2013). Sensors for fire detection. *Sensor Review*.

Bourareche, M., Nait Said, R., Zidani, F., & Ouazraoui, N. (2020). Improving barrier and operational risk analysis (BORA) using criticality importance analysis case study: oil and gas separator. *World Journal of Engineering*, 17(2), 267–282. <https://doi.org/10.1108/WJE-04-2019-0129>

Bourareche, M., Ouazraoui, N., Nait-saïd, R., Sellami, I., Bourareche, M., Ouazraoui, N., Nait-saïd, R., Sellami, I., & Per-, H. B. (2011). Performances des barrières de sécurité , un indicateur de bonne maîtrise des risques d'un procédé industriel. *7ème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, CPI'2011*.

Bradley, D., Chamberlain, G. A., & Drysdale, D. D. (2012). Large vapour cloud explosions, with particular reference to that at Buncefield. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1960), 544–566. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0419>

Brunesi, E., Nascimbene, R., Pagani, M., & Beilic, D. (2015). Seismic Performance of Storage Steel Tanks during the May 2012 Emilia, Italy, Earthquakes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(5), 04014137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000628](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000628)

CEI 61508. (1998). *Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques et électroniques programmables relatifs à la sécurité*. Paris: AFNOR.

Centeno, F. R., Beshir, M., & Rush, D. (2020). Influence of wind on the onset of flashover within small-scale compartments with thermally-thin and thermally-thick boundaries. *Fire Safety Journal*, 117(July), 103211. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103211>

Chettouh, S. (2021). Proposition d'une démarche de Retour d'Expérience pour l'évaluation et la prévention des accidents industriels. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 7(1), 1805–1818.

CHETTOUH, S. (2016). *MODELES STATISTIQUES POUR L'EVALUATION DES INCERTITUDES ASSOCIEES AUX EFFETS DU RISQUE INCENDIE*. UNIVERSITE DE BATNA.

Chettouh, S., & Hamzi, R. (2015). Statistical / Dynamic approach to assess the effects of industrial fire Statistical / Dynamic approach to assess the effects of industrial fire. *QUALITA' 2015*.

Chettouh, S., Hamzi, R., & Benaroua, K. (2016). Examination of fire and related accidents in Skikda Oil Refinery for the period 2002-2013. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.03.014>

Chettouh, S., Hamzi, R., & Chebila, M. (2018). Contribution of the lessons learned from oil refining accidents to the industrial risks assessment. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 29(4), 643–665. <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2017->

0067

- Chettouh, S., Hamzi, R., Haddad, D., & Bourmada, N. (2013). Modèles numériques pour l'évaluation des effets de l'incendie sur l'environnement atmosphérique Application des logiciels: FLUENT, ALOHA. *Qualita2013*.
- Courdec, C. (2012). *Caracterisation Experimentale Et Modelisation De L'Incidence Des Ecoulements Pulses Sur Le Comportement D'Une Turbine De Suralimentation Automobile*. Ecole Centrale de Nantes.
- Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2001). *Chemical process safety: fundamentals with applications*. Pearson Education.
- DALEMONT, É., & CARRIÉ, J. (1992). *Le pétrole* (P. U. de France (Ed.); 11th ed.). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- De Dianous, V., & Fiévez, C. (2006). ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance. *Journal of Hazardous Materials*, 130(3 SPEC. ISS.), 220–233. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.010>
- De l'essence - Gasoline*. (2020). [https://fr.qaz.wiki/wiki/Gasoline#:~:text=Le dictionnaire anglais d'Oxford,» ou «-ène»](https://fr.qaz.wiki/wiki/Gasoline#:~:text=Le%20dictionnaire%20anglais%20d'Oxford,»%20ou%20«-ène»).
- de Ruijter, A., & Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review. *Safety Science*, 88, 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>
- Delvosalle, C., Fievez, C., Pipart, A., & Debray, B. (2006). ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. *Journal of Hazardous Materials*, 130(3 SPEC. ISS.), 200–219. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.005>
- Desanghere, S. (2006). *Détermination des conditions d'échauffement de structure extérieure à un bâtiment en situation d'incendie*. l'Institut national des sciences appliquées de Rouen.
- Duijm, N. J. (2009). Safety-barrier diagrams as a safety management tool. *Reliability Engineering and System Safety*, 94(2), 332–341. <https://doi.org/10.1016/j.res.2008.03.031>
- Duong, D. (2012). *Etude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe*. UNIVERSITÉ D'ORLÉANS ÉCOLE.
- Environmental Protection Agency. (2004). *Guidance Note on Storage and Transfer of Materials for Scheduled Activities*. Environmental Protection Agency.
- Ericson, C. A., & LI, C. (1999). Fault tree analysis. *System Safety Conference, Orlando, Florida, 1*, 1–9.
- Evans, J. B. (1988). *Structures of discrete event simulation: an introduction to the engagement strategy*. Ellis Horwood Chichester.
- fanchon, jean louis. (2008). *Mécanique* (berti editions (Ed.)).

- Flores-Cortez, O., Cortez, R., & González, B. (2021). Design and Implementation of an IoT Based LPG and CO Gases Monitoring System. *Computer Science & Information Technology (CS & IT)*, 31–39. <https://doi.org/10.5121/csit.2021.110803>
- FRANCE 24. (2020). *Russie : la progression de la “marée rouge” de carburant dans l’Arctique a été “stoppée.”* <https://www.france24.com/fr/20200605-russie-maree-rouge-riviere-arctique-stoppee-permafrost-changement-climatique>
- Froquet, L. (2005). *Contribution à l’analyse des risques : Proposition d’une méthode par scénarios et capitalisation de la connaissance*. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Fu, J., Sunden, B., & Chen, X. (2013). Analysis of self-pressurization phenomenon in a cryogenic fluid storage tank with VOF method. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 1, 1–10. <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-63209>
- Fuentes-Bargues, J. L., González-Cruz, M. C., González-Gaya, C., & Baixauli-Pérez, M. P. (2017). Risk analysis of a fuel storage terminal using HAZOP and FTA. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph14070705>
- Fumey, M. (2001). *Méthode d’Evaluation des Risques Agrégés: application au choix des investissements de renouvellement d’installations*.
- Galizia, A. D. E., Simon, C., Weber, P., Iung, B., Duval, C., Serdet, E., Galizia, A. D. E., Simon, C., Weber, P., Iung, B., & Duval, C. (2015). Investigation avancée des méthodes d’étude probabiliste de l’efficacité des actions humaines dans les systèmes socio-techniques. *QUALITA 2015*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01149770>
- Ghassemi, H., Baek, S. W., & Khan, Q. S. (2006). Experimental study on evaporation of kerosene droplets at elevated pressures and temperatures. *Combustion Science and Technology*, 178(9), 1669–1684. <https://doi.org/10.1080/00102200600582392>
- Giraldo, F. M. (2007). *Utilisation de l’ensemble méthodologique MADS/MOSAR pour l’évaluation des systèmes de barrières de sécurité: application au secteur minier colombien*. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Gómez-Mares, M., Muñoz, M., & Palacios, A. (2012). Jet fires: A “minor” fire hazard joaquim casal. *Chemical Engineering Transactions*, 26, 13–20. <https://doi.org/10.3303/CET1226003>
- Grattan, D. D. J. (2018). Improving barrier effectiveness using human factors methods. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 55(June), 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.07.016>
- Gravier, J. F. (1900). *Propriétés des fluides de gisements* (Vol. 2). Editions Technip.
- Griffith, C. D., & Mahadevan, S. (2011). Inclusion of fatigue effects in human reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(11), 1437–1447.
- GT Aspects sémantiques du risque. (1997). *Vocabulaire lié au risque à travers une analyse*

- bibliographique*. Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) - Observatoire de l'Opinion sur les Risques et la Sécurité.
- Guillemet, R. (1992). *Protection des réservoirs de stockage sous pression dans les flammes: l'arrosage par ruissellement d'eau et l'ignifugation*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Hadj-MabroukHadj, Habib Abderraouf, M. (2004). *Approche d'integration de l'erreur humaine dans le retour d'expérience*. (0769-0274 ; 43) Collection : (Synthèse INRETS (Ed.); INRETS/Lav). Arcueil, France : Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité.
- Hale, A. (2003). Note on barriers and delivery systems. *PRISM Conference, Athens*.
- HAMMOUYA, A., CHAIB, R., VERZEA, I., & HAMMOUYA, D. E. (2021). STUDY OF THE HUMAN WHOLE-BODY VIBRATION TRANSMISSION (CASE STUDY). *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING*, 64(2). <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/1604>
- Hammouya, A., Kabouche, A., & Chaib, R. (2019). Study of Drain Barrier Effect on Hydrocarbons Hazards. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19(5). <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00748-1>
- Hammouya, Amel, & Chaib, R. (2020). Human Factor: A Key Element in A Fire Safety System Of Hydrocarbon Storage Tank. *2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/ISCV49265.2020.9204292>
- Hammouya, Amel, & Hammouya, D. (2021a). ÉVALUATION DES RISQUES LIÉS AU REJET D'HYDROCARBURES DANS L'AIR. *International Journal of Human Settlements*, 5(2), 500–509.
- Hammouya, Amel, & Hammouya, D. ellah. (2021b). Evaluation des risques liés au rejet d'hydrocarbures dans l'air. *Séminaire International Sur Les Sciences Naturelles et de La Vie*.
- Hammouya, Amel, & Kabouche, A. (2017). Etude de phénomène BOIL OVER (Causes, conséquences et leurs barrières de sécurité). *Conférence: Conférence Internationale Sur La Maintenance et La Sécurité Industrielle CIMSI '2017*.
- Hammouya, Amel, & Kabouche, A. (2019). Analyse de risque de libérations chimiques d'un bac de stockage d'hydrocarbure. *Séminaire International Environnement et Toxicologie (SINENTOX 2019)*.
- Hamzi, R. (2008). *Modélisation et impacts à court terme d'un incendie en milieu ouvert sur l'environnement*. Université de Batna.
- Hariz, S., & Telli, F. (2019). The Evaluation of Safety Barriers Using the Method Lopa Case: Haoud Berkaoui in Sonatrach. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 7(3), 68.

- Hilpert, M., Mora, B. A., Ni, J., Rule, A. M., & Nachman, K. E. (2015). Hydrocarbon release during fuel storage and transfer at gas stations: environmental and health effects. *Current Environmental Health Reports*, 2(4), 412–422.
- Hollnagel, E. (1995). The art of efficient man-machine interaction: Improving the coupling between man and machine. *Expertise and Technology: Cognition & Human-Computer Cooperation*, 229–241.
- Hollnagel, E. (2004). *Barriers and accident prevention* (A. P. Ltd (Ed.)).
- Hollnagel, E. (2008). Risk+ barriers= safety? *Safety Science*, 46(2), 221–229.
- Hollnagel, E. (2016). *Barriers and accident prevention*. Routledge.
- Hollnagel, E. (1999). Accidents and barriers. *Proceedings of Lex Valenciennes*, 175–182.
- Hristov, J., Planas-Cuchi, E., Arnaldos, J., & Casal, J. (2004). Accidental burning of a fuel layer on a waterbed: a scale analysis of the models predicting the pre-boilover time and tests to published data. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(3), 221–239.
- <https://www.agriexpo.online/fr/prod/prive-sa/product-175639-71273.html>. (n.d.).
<https://www.agriexpo.online/fr/prod/prive-sa/product-175639-71273.html>
- IEC:61508. (1998). *Part 1–7 Functional safety of electrical /electronic / Programmable electronic safety-related systems*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- IEC:61511. (2002). *Functional safety—Safety instrumented systems for the process industry sector*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- Innal, F. (2008). *Contribution to modelling safety instrumented systems and to assessing their performance critical analysis of IEC 61508 standard*. University of Bordeaux, France.
- ISO:13702. (1999). *Petroleum and natural gas industries—Control and Mitigation of fires and explosions on offshore production installations— Requirements and guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO/CEI Guide 51. (1999). *Aspects liés à la sécurité – principes directeurs pour les inclure dans les normes*. ISO/CEI.
- ISO/CEI Guide 73. (2002). *Management du risque – Vocabulaire – principes directeurs pour les inclure dans les normes*. ISO/CEI.
- ISO/FDIS 31000. (2009). *Management du risque — Principes et lignes directrices, Risk management — Principles and guidelines* (ISO (Ed.)).
- ISO 13702. (2015). *Petroleum and natural gas industries — Control and mitigation of fires and explosions on offshore production installations — Requirements and guidelines Industries*.
- ISO 45001. (2018). *Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail — Exigences et lignes directrices pour leur utilisation* (ISO (Ed.)).

- ISO14692-1. 2017. (n.d.). *Petroleum and natural gas industries — Glass-reinforced plastics (GRP) piping*.
- Jaca, R. C., & Godoy, L. A. (2010). Wind buckling of metal tanks during their construction. *Thin-Walled Structures*, 48(6), 453–459. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.01.001>
- Jahangiri, M., Hoboubi, N., Rostamabadi, A., Keshavarzi, S., & Hosseini, A. A. (2016). Human Error Analysis in a Permit to Work System: A Case Study in a Chemical Plant. *Safety and Health at Work*, 7(1). <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2015.06.002>
- Jimenez-Gonzalez, C., & J.C.Constable, D. (2011). *Green chemistry and engineering : a practical design approach* (J. Wiley (Ed.)).
- Johnson, W. G. (1980). *MORT safety assurance systems* (Vol. 4). Marcel Dekker Inc.
- Jolly, S., & Leroy, G. (2014). Ω -8 Feu torche. INERIS.
- Jung, S., Woo, J., & Kang, C. (2020). Analysis of severe industrial accidents caused by hazardous chemicals in South Korea from January 2008 to June 2018. *Safety Science*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104580>
- Kang, J., Zhang, J., & Gao, J. (2016). Analysis of the safety barrier function: Accidents caused by the failure of safety barriers and quantitative evaluation of their performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 43, 361–371. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.06.010>
- Kaźmierczak, S. (2015). Selected issues of prestressed concrete containment tanks for the storage of liquefied gases design in accordance with EN 14620. *Czasopismo Techniczne*, 2015(Budownictwo Zeszyt 3-B (23) 2015), 101–113.
- Kecklund, L. J., Edland, A., Wedin, P., & Svenson, O. (1996). Safety barrier function analysis in a process industry: a nuclear power application. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 17(3), 275–284.
- Kovacevic, S., Papic, L., Janackovic, G. L., & Savic, S. (2016). The analysis of human error as causes in the maintenance of machines: A case study in mining companies. *South African Journal of Industrial Engineering*, 27(4). <https://doi.org/10.7166/27-4-1493>
- Kurowski, P. (2013). *Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2013*. SDC publications.
- Laboureur, D., Birk, A. M., Buchlin, J. M., Rambaud, P., Aprin, L., Heymes, F., & Osmont, A. (2015). A closer look at BLEVE overpressure. *Process Safety and Environmental Protection*, 95, 159–171.
- Landucci, G., Argenti, F., Tugnoli, A., & Cozzani, V. (2015). Quantitative assessment of safety barrier performance in the prevention of domino scenarios triggered by fire. *Reliability Engineering and System Safety*, 143, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.03.023>
- Larousse collectif. (2006). *Le Petit Larousse illustré 2007* (Larousse (Ed.); 2007e édit). <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/aliphatique/2284>

- Lauridsen, O., Lootz, E., Husebo, T., & Ersdal, G. (2016). Barrier management and the interaction between technical, operational and organisational barrier elements. *Society of Petroleum Engineers - SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Security, Environment, and Social Responsibility*. <https://doi.org/10.2118/179364-ms>
- Le Moigne, J.-L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes* (Dunod (Ed.)).
- Le Secrétariat Général du Gouvernement. (2020). <https://www.joradp.dz/HFR/Index.htm>
- Lee, J., Kang, Y., & Kim, H. (2015). The Verify of Environmental Toxicity of Foam Extinguishing Agents by Fish-Acute Toxicity Test. *Journal of the Korean Society of Safety*, 30(4), 51–55. <https://doi.org/10.14346/jkosos.2015.30.4.51>
- Leite, R. M., & Centeno, F. R. (2018). Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires. *Journal of Hazardous Materials*, 342, 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.052>
- Leplat, J., & Cellier, J.-M. (1990). *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Ed. Octares Entreprises.
- Les industries. (2020). http://www.crdp-strasbourg.fr/data/albums/geo_industries/index.php?img=7&parent=29
- Li, Zhaofeng, Zhou, Z., Li, M., Zhang, B., & Dai, B. (2018). Delayed Drainage of a Largely Deformed Aquitard due to Abrupt Water Head Decline in Adjacent Aquifer. *Geofluids*, 2018, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/2326491>
- Li, Zheng, & Wang, Q. (2011). Experimental study of explosive water mist extinguishing fire. *Procedia Engineering*, 11, 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.655>
- Lievens, C. (1976). *Sécurité des systèmes*. Cepadues éditions.
- Marca, D. A., & McGowan, C. L. (1987). *SADT: structured analysis and design technique*. McGraw-Hill, Inc.
- Maxwell, A., & Lawal, A. (2016). Petroleum product storage tank, design and loss control management. *Society of Petroleum Engineers - SPE African Health, Safety, Security and Environment and Social Responsibility Conference and Exhibition 2016, 1997*, 355–369. <https://doi.org/10.2118/183615-ms>
- Mazouni, M. H. (2008). *Pour une Meilleure Approche du Management des Risques : De la Modélisation Ontologique du Processus Accidentel au système interactif d'aide à la décision*. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Mihalache, A. G. (2007). *Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques: application sur système embarqué*. Université d'Angers.
- Minter, S. G. (2002). Ergonomic Challenge: The Aging Work Force; Ergonomist Connie Vaughn-Miller Sounds a Warning about the Need for Ergonomic Interventions to Keep Older Workers Productive. *Occupational Hazards*, 64(9).

<https://www.questia.com/read/1G1-91673468/ergonomic-challenge-the-aging-work-force-ergonomist>

- Monavon, A. (2010). *Mini manuel de Mécanique des fluides* (Dunod (Ed.)).
- Neogy, P., Hanson, A. L., Davis, P. R., & Fenstermacher, T. E. (1996). Hazard and Barrier analysis guidance document, Rev. 0. *US Department of Energy (DoE), EH-33 Office of Operating Experience Analysis and Feedback*.
- NF EN 50126. (2000). Applications ferroviaires: spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS). *Paris AFNOR*.
- Nicolet, J.-L., & Celier, J. (1985). La fiabilité humaine dans l'entreprise. *Revue Générale Nucléaire*, 3, 214–219.
- NOAA's National Ocean Service, O. of R. and R. (2015). *ALOHA* ®. <https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/aloha.pdf>
- Nolan, D. P. (1996). Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical. In *Fire Protection Engineering*.
- NRF-015-PEMEX-2008. (2008). *PROTECTION DES ZONES DE STOCKAGE ET DES RÉSERVOIRS DE PRODUITS INFLAMMABLES ET COMBUSTIBLES*.
- O'Mahony, M. T., Doolan, D., O'Sullivan, A., & Hession, M. (2008). Emergency planning and the Control of Major Accident Hazards (COMAH/Seveso II) Directive: An approach to determine the public safety zone for toxic cloud releases. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.065>
- OHSAS 18001. (2007). *Occupational Health and Safety Management Systems – Specification*. England: BSI.
- cheremisinoff, N. (2000). *Handbook of hazardous chemical properties* (Butterworth_heinemann (Ed.)).
- Parke, D. V. (1989). *Introduction: session on metabolism*.
- Partie, A. (2014). *Guide Réservoirs de stockage*.
- Patricia, K., Nguyen-Thuy, L., Sylvain, C., Valérie, D. D., & Sébastien, B. (2010). BADORIS - Document de synthèse relatif à une Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.): Cuvette de rétention. In *INERIS*. ???
- Périlhon, P. (1999). *Du risque à l'analyse des risques: Développement d'une méthode MOSAR, méthode organisée et systémique d'analyse des risques, document de travail*.
- Perneger, T. V. (2005). The Swiss cheese model of safety incidents: are there holes in the metaphor? *BMC Health Services Research*, 5(1), 71.
- Peters, G. A., & Peters, B. J. (2006). *Human error: Causes and control*. CRC press.

- Peters, N. (2001). *Turbulent combustion*. IOP Publishing.
- Petit Larousse illustré*. (1919). Larousse. <https://books.google.dz/books?id=ZozrAAAAMAAJ>
- Petit Robert. (1984). *Dictionnaire*.
- Pitana, T., Prastowo, H., & Mahdali, A. P. (2020). The Development of Fire Safety Appliances Inspection Training using Virtual Reality (VR) Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 557(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/557/1/012064>
- PSA. (2002). *Guidelines to regulations relating to management in the petroleum activities (The management regulations)*. Norway, Stavanger: Petroleum Safety Authority.
- Puello, J., Gómez, S., Ruiz, I., Lombana, S., & Figueroa, S. (2020). Application of HAZOP, LOPA and SIL to an Alkylolation Unit in a Refinery: a Case Study. *CHEMICAL ENGINEERING*, 82.
- Qi, D. H., & Lee, C. F. (2016). Combustion and emissions behaviour for ethanol–gasoline-blended fuels in a multipoint electronic fuel injection engine. *International Journal of Sustainable Energy*, 35(4), 323–338. <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.895004>
- Rajeev, K., Soman, S., Renjith, V. R., & George, P. (2019). Human vulnerability mapping of chemical accidents in major industrial units in Kerala, India for better disaster mitigation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 39, 101247. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101247>
- Rasmussen, S. C. (2018). *Acetylene and Its Polymers: 150+ Years of History*. Springer.
- Reason, J, Hollnagel, E., & Paries, J. (2006). Revisiting the Swiss cheese model of accidents. *Journal of Clinical Engineering*, 27(4), 110–115.
- Reason, James. (1990). *Human error*. Cambridge university press.
- Reason, James. (1993). The identification of latent organizational failures in complex systems. In *Verification and validation of complex systems: Human factors issues* (pp. 223–237). Springer.
- Reason, James. (2000). Human error: models and management. *Bmj*, 320(7237), 768–770.
- Reason, James. (2016). *Managing the risks of organizational accidents*. Routledge.
- Reeburgh, W. S. (2007). Oceanic Methane Biogeochemistry. *Chemical Reviews*, 107(2), 486–513. <https://doi.org/10.1021/cr050362v>
- Rengel, B., Mata, C., Pastor, E., Casal, J., & Planas, E. (2018). A priori validation of CFD modelling of hydrocarbon pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.08.002>
- Rolland, C. (1986). Introduction à la conception des systèmes d'information et panorama des méthodes disponibles. *Génie Logiciel*, 4, 6–11.

- Rollenhagen, C. (2003). To investigate accidents, theory and practice. *Lund: Student Literature*.
- Rouidi, S. (2014). *Evaluation de la contamination par les hydrocarbures des sédiments superficiels (fluviaux et marins) de la région de Skikda (nord-est algérien). Analyse statistiques* . UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA.
- Sallak, M. (2007). *Evaluation de paramètres de sûreté de fonctionnement en présence d ' incertitudes et aide à la conception : application aux Systèmes Instrumentés de Sécurité*. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL.
- Schiffer, H.-W. (2016). *World Energy Resources 2016*. https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources_FullReport_2016.pdf
- Seljelid, J., Haugen, S., Sklet, S., & Vinnem, J. E. (2007). *Operational risk analysis – Total analysis of physical and non-physical barriers*.
- Sellami, I. (2019). *Contribution à l'Analyse Quantitative des Risques Industriels : Application à l'Industrie des Procédés Soutenue* [UNIVERSITÉ DE BATNA - 2 - MOSTEFA BEN BOULAÏD]. <http://bib.rilk.com/5521/>
- Sellami, I., Manescau, B., Chetehouna, K., de Izarra, C., Nait-Said, R., & Zidani, F. (2018). BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54(September 2017), 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.02.010>
- Seo, M., & Jeong, S. (2010). Analysis of self-pressurization phenomenon of cryogenic fluid storage tank with thermal diffusion model. *Cryogenics*, 50(9), 549–555. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.02.021>
- Seyferth, D. (2001). *Zinc alkyls, Edward Frankland, and the beginnings of main-group organometallic chemistry*. ACS Publications.
- Sklet, S., Aven, T., Hauge, S., & Vinnem, J. E. (2005). Incorporating human and organizational factors in risk analysis for offshore installations. *Advances in Safety and Reliability - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2005*, 2(May 2014), 1839–1847.
- Sklet, Snorre. (2005). Safety Barriers on Oil and Gas Platforms. Means to Prevent Hydrocarbon Releases. In *Science And Technology* (Issue December). Norwegian University of Science and Technology.
- Sklet, Snorre. (2006a). Hydrocarbon releases on oil and gas production platforms: Release scenarios and safety barriers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(5), 481–493.
- Sklet, Snorre. (2006b). Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(5), 494–506.
- Sobral, J., & Guedes Soares, C. (2019). Assessment of the adequacy of safety barriers to hazards. *Safety Science*, 114(September 2018), 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.12.021>

SOLIDWORKS data base version (2016). (2019).

Soltani, M. (2004). *Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram-négatives hydrocarbonoclastes . Variation en fonction de la source de carbone .* L'UNIVERSITE PARIS 6.

Sowards, J. W., Williamson, C. H. D., Weeks, T. S., McColskey, J. D., & Spear, J. R. (2014). The effect of *Acetobacter* sp. and a sulfate-reducing bacterial consortium from ethanol fuel environments on fatigue crack propagation in pipeline and storage tank steels. *Corrosion Science*, 79, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.10.036>

Spdu10. (2016). *4 janvier 1966.....la catastrophe de la raffinerie de Feyzin.* <https://spdu10.skyrock.com/3267861006-4-janvier-1966-la-catastrophe-de-la-raffinerie-de-Feyzin.html>

Sutton, I. (2015). *Chapter 9 - Asset Integrity* (I. B. T.-P. R. and R. M. (Second E. Sutton (Ed.); pp. 398–407). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801653-4.00009-6>

Svenson, O. (1991). The accident evolution and barrier function (AEB) model applied to incident analysis in the processing industries. *Risk Analysis*, 11(3), 499–507.

Taleb Berrouane Mohammed. (2017). *Simulation of Industrial Accidents Due to Uncontrolled Pressures.* Université d'Oran 2 Institut de Maintenance et de sécurité Industrielle.

Tanzi, T., & Delmer, F. (2006). *Ingénierie du risque.* Hermès science publications.

Torres-Echeverria, A. C. (2016). On the use of LOPA and risk graphs for SIL determination. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 333–343.

V.Giles, R. (1986). *mecanique des fluids et hydrolique* (paris).

Villemeur, A. (1988). *Suret  de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité-facteurs humains, informatisation.*

Vinnem, J. E., Aven, T., Hauge, S., Seljelid, J., & Veire, G. (2004). Integrated barrier analysis in operational risk assessment in offshore petroleum operations. *Probabilistic Safety Assessment and Management*, 620–625.

Wahlstrom, B., & Gunsell, L. (1998). *Reactor safety; A Description and Assessment of the Nordic safety work.* Riso forskningscenter: NKS-sekretariatet.

Wiegmann, D. A., & Shappell, S. A. (2001). *A human error analysis of commercial aviation accidents using the human factors analysis and classification system (HFACS).*

Wu, H., Wu, D., & Zhao, J. (2019). An intelligent fire detection approach through cameras based on computer vision methods. *Process Safety and Environmental Protection*, 127, 245–256.

Xing-yi, Z. (2012). Application and development status of Foam extinguishing agent. *Journal of the Hebei Academy of Sciences*, 3, 17.

- XING, Y. B.-Q. C. K., & Jin-Xin, H. X. (2009). Perfluorobutyl-Based Fluorinated Surfactant with High Surface Activity [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 12.
- Yazdi, M. (2017). The Application of Bow-Tie Method in Hydrogen Sulfide Risk Management Using Layer of Protection Analysis (LOPA). *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17(2), 291–303. <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0247-x>
- Ye, X. (1994). *Modélisation et simulation des systèmes de production : une approche orientée-objets*. L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON.
- Zhang, L., Li, Y., Duan, Q., Chen, M., Xu, J., Zhao, C., Sun, J., & Wang, Q. (2020). Experimental study on the synergistic effect of gas extinguishing agents and water mist on suppressing lithium-ion battery fires. *Journal of Energy Storage*, 32(June), 101801. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101801>
- Zhang, M., Song, W., Wang, J., & Chen, Z. (2014). Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike. *Procedia Engineering*, 84, 565–577. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.469>

ANNEXES

Annexes

Annexe 1 : Principales lois sur les hydrocarbures, l'environnement et la sécurité

Loi n° 13-01 modifiant et complétant la loi n° 05-07 : « Relative aux hydrocarbures » de **Journal Officiel** N° 11 le 24/2/ 2013 :

4	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 11	14 Rabie Ethani 1434 24 février 2013
LOIS		
<p>Loi n° 13-01 du 19 Rabie Ethani 1434 correspondant au 20 février 2013 modifiant et complétant la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005 relative aux hydrocarbures.</p> <p style="text-align: center;">-----</p>(sans changement jusqu'à).....	
<p>Le Président de la République,</p>	<p>Collectes, dessertes et conduites d'évacuation :</p>	
<p>Vu la Constitution, notamment ses articles 12, 17, 18, 122 et 126 ;</p>	<p>Collectes : Réseau de conduites enterrées ou aériennes de différents diamètres permettant de relier :</p>	
<p>Vu la loi n° 90-30 du 1er décembre 1990, modifiée et complétée, portant loi domaniale ;</p>	<p>— soit la tête de puits producteurs au centre de traitement des hydrocarbures gazeux ou au centre de séparation,</p>	
<p>Vu la loi n° 01-11 du 11 Rabie Ethani 1422 correspondant au 3 juillet 2001 relative à la pêche et l'aquaculture ;</p>	<p>— soit les centres de traitement aux installations de réinjection,</p>	
<p>Vu la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005, modifiée et complétée, relative aux hydrocarbures ;</p>	<p>— soit les centres de séparation aux centres principaux de collecte.</p>	
<p>Vu la loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1416 correspondant au 4 août 2005, modifiée et complétée, relative à l'eau ;</p>	<p>Dessertes : Réseau de conduites enterrées ou aériennes de différents diamètres permettant de relier les installations d'injection aux têtes de puits injecteurs.</p>	
<p>Vu la loi n° 08-09 du 18 Safar 1429 correspondant au 25 février 2008 portant code de procédure civile et administrative ;</p>	<p>Conduites d'évacuation : Conduites enterrées ou aériennes de différents diamètres permettant de relier :</p>	
<p>Vu la loi n° 11-10 du 20 Rajab 1432 correspondant au 22 juin 2011 relative à la commune ;</p>	<p>— soit les centres de traitement aux systèmes de transport par canalisation,</p>	
<p>Vu la loi n° 12-07 du 28 Rabie Aouel 1433 correspondant au 21 février 2012 relative à la wilaya ;</p>	<p>— soit les centres principaux de collecte aux systèmes de transport par canalisation,</p>	
<p>Après avis du Conseil d'Etat ;</p>	<p>— soit un centre de traitement ou de séparation situé sur un périmètre d'exploitation à un centre de réinjection situé sur un autre périmètre d'exploitation,</p>	
<p>Après adoption par le Parlement ;</p>	<p>— soit les centres de stockage sur champ aux systèmes de transport par canalisation.</p>	
<p>Promulgue la loi dont la teneur suit :</p>(sans changement jusqu'à).....	
<p>Article 1er. — La présente loi a pour objet de modifier et de compléter certaines dispositions de la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005, modifiée et complétée, relative aux hydrocarbures.</p>	<p>Concessionnaire : L'entreprise nationale SONATRACH-SPA ou une de ses filiales qui bénéficie, à ses risques, frais et périls, de concession de transport par canalisation.</p>	
<p>Art. 2. — <i>Les articles 5, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 60, 63, 68, 69, 71, 72, 73, 75, 77, 78, 82, 83, 84, 85, 87, 89, 90, 91, 101 et 109 de la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005, susvisée, sont modifiés et complétés comme suit :</i></p>	<p>Est également concessionnaire toute personne bénéficiant, à ses risques, frais et périls, de concession de canalisations internationales.</p>	
<p>« Art. 5. — Au sens de la présente loi, on entend par :</p>(sans changement jusqu'à).....	
.....(sans changement jusqu'à).....	<p>Gaz non associés : Tous les hydrocarbures gazeux, qu'ils soient humides ou secs, qui :</p>	
<p>Baril équivalent pétrole (b.e.p) : Volume d'hydrocarbures liquides ou gazeux ayant une teneur énergétique de 5,90 Giga Joules égale à celle d'un baril de pétrole brut.</p>	<p>— sont produits à la tête du puits et qui contiennent plus de cent (100) mille pieds cubes, équivalant à 2836,82 mètres cubes de gaz pour chaque baril de pétrole brut ou de liquide de gaz naturel produit par un réservoir situé dans le sous-sol.</p>	
	<p>— sont produits d'un réservoir qualifié comme ne contenant que du gaz même si celui-ci se trouve dans un forage de puits par lequel du pétrole brut est aussi produit par l'intérieur d'une autre colonne de casing ou de tubing .</p>	

Loi N°03-10 « Relative A La Protection De L'environnement Dans Le Cadre Du Développement Durable» de **Journal Officiel** N° 43 le 20/7/ 2003 :

6	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 43	20 Jomada El Oula 1424 20 juillet 2003
<p>Loi n° 03-10 du 19 Jomada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.</p> <p>Le Président de la République,</p> <p>Vu la Constitution, notamment ses articles 119, 120, 122-19° et 126 ;</p> <p>Vu l'ordonnance n° 66-154 du 8 juin 1966, modifiée et complétée, portant code de procédure civile ;</p> <p>Vu l'ordonnance n° 66-155 du 8 juin 1966, modifiée et complétée, portant code de procédure pénale ;</p> <p>Vu l'ordonnance n° 66-156 du 8 juin 1966, modifiée et complétée, portant code pénal ;</p> <p>Vu l'ordonnance n° 73-38 du 25 juillet 1973 portant ratification de la convention concernant la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel faite à Paris le 23 novembre 1972 ;</p> <p>Vu l'ordonnance n° 74-55 du 13 mai 1974 portant ratification de la convention internationale relative à la création d'un fonds international d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures, faite à Bruxelles le 18 décembre 1971 ;</p> <p>Vu l'ordonnance n° 75-58 du 26 septembre 1975, modifiée et complétée, portant code civil ;</p> <p>Vu l'ordonnance n° 76-04 du 20 février 1976 relative aux règles applicables en matière de sécurité contre les risques de l'incendie et de panique et à la création de commissions de prévention et de protection civile ;</p> <p>Vu l'ordonnance n° 76-80 du 23 octobre 1976, modifiée et complétée, portant code maritime ;</p> <p>Vu la loi n° 79-07 du 21 juillet 1979, modifiée et complétée, portant code des douanes ;</p> <p>Vu la loi n° 82-10 du 21 août 1982 relative à la chasse ;</p> <p>Vu la loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement ;</p> <p>Vu la loi n° 83-17 du 16 juillet 1983, modifiée et complétée, portant code des eaux ;</p> <p>Vu la loi n° 84-12 du 23 juin 1984, modifiée et complétée, portant régime général des forêts ;</p> <p>Vu la loi n° 84-17 du 7 juillet 1984, modifiée et complétée, relative aux lois de finances ;</p> <p>Vu la loi n° 85-05 du 16 février 1985, modifiée et complétée, relative à la protection et à la promotion de la santé ;</p> <p>Vu la loi n° 87-17 du 1er août 1987 relative à la protection phytosanitaire ;</p> <p>Vu la loi n° 88-08 du 26 janvier 1988 relative à la médecine vétérinaire et à la protection de la santé animale ;</p> <p>Vu la loi n° 89-23 du 19 décembre 1989, modifiée et complétée, relative à la normalisation ;</p>	<p>Vu la loi n° 90-08 du 7 avril 1990 relative à la commune ;</p> <p>Vu la loi n° 90-09 du 7 avril 1990 relative à la wilaya ;</p> <p>Vu la loi n° 90-25 du 18 novembre 1990, modifiée et complétée, portant orientation foncière ;</p> <p>Vu la loi n° 90-29 du 1er décembre 1990, modifiée et complétée, relative à l'aménagement et l'urbanisme ;</p> <p>Vu la loi n° 90-30 du 1er décembre 1990 portant loi domaniale ;</p> <p>Vu la loi n° 90-31 du 4 décembre 1990 relative aux associations ;</p> <p>Vu la loi n° 97-02 du 2 Ramadhan 1418 correspondant au 31 décembre 1997 portant loi de finances pour 1998 ;</p> <p>Vu la loi n° 98-04 du 20 Safar 1419 correspondant au 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel ;</p> <p>Vu la loi n° 99-09 du 15 Rabie Ethani 1420 correspondant au 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie ;</p> <p>Vu la loi n° 01-10 du 11 Rabie Ethani 1422 correspondant au 3 juillet 2001 portant loi minière ;</p> <p>Vu la loi n° 01-11 du 11 Rabie Ethani 1422 correspondant au 3 juillet 2001 relative à la pêche et à l'aquaculture ;</p> <p>Vu la loi n° 01-14 du 29 Jomada El Oula 1422 correspondant au 19 août 2001 relative à l'organisation, la sécurité et la police de la circulation routière ;</p> <p>Vu la loi n° 01-19 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets ;</p> <p>Vu la loi n° 01-20 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à l'aménagement et au développement durable du territoire ;</p> <p>Vu la loi n° 02-01 du 22 Dhou El Kâada 1422 correspondant au 5 février 2002 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation ;</p> <p>Vu la loi n° 02-02 du 22 Dhou El Kâada 1422 correspondant au 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral ;</p> <p>Vu la loi n° 03-03 du 16 Dhou El Hidja 1423 correspondant au 17 février 2003 relative aux zones d'expansion et aux sites touristiques ;</p> <p>Vu le décret n° 63-344 du 11 septembre 1963 portant adhésion à la convention internationale pour la prévention de la pollution des eaux de la mer par les hydrocarbures ;</p> <p>Vu le décret n° 80-14 du 26 janvier 1980 portant adhésion de l'Algérie à la convention pour la protection de la mer méditerranée contre la pollution, faite à Barcelone le 16 février 1976 ;</p>	

18 Dhou El Kaâda 1440 21 juillet 2019	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 46	5
LOIS		
Loi n° 19-02 du 14 Dhou El Kaâda 1440 correspondant au 17 juillet 2019 relative aux règles générales de prévention des risques d'incendie et de panique. -----	Vu la loi n° 12-07 du 28 Rabie El Aouel 1433 correspondant au 21 février 2012 relative à la wilaya ;	
Le Chef de l'Etat,	Après avis du Conseil d'Etat ;	
Vu la Constitution, notamment ses articles 102 (alinéa 6), 136, 138, 140, 143 (alinéa 2) et 144 ;	Après adoption par le Parlement ;	
Vu l'ordonnance n° 66-155 du 8 juin 1966, modifiée et complétée, portant code de procédure pénale ;	Promulgue la loi dont la teneur suit :	
Vu l'ordonnance n° 66-156 du 8 juin 1966, modifiée et complétée, portant code pénal ;	CHAPITRE 1er DISPOSITIONS GENERALES	
Vu l'ordonnance n° 75-58 du 26 septembre 1975, modifiée et complétée, portant code civil ;	<i>Section 1</i>	
Vu l'ordonnance n° 75-59 du 26 septembre 1975, modifiée et complétée, portant code de commerce ;	<i>Objet</i>	
Vu l'ordonnance n° 76-04 du 20 février 1976 relative aux règles applicables en matière de sécurité contre les risques d'incendie et de panique et à la création de commissions de prévention et de protection civile ;	Article 1er. — La présente loi a pour objet de définir les règles générales de prévention des risques d'incendie et de panique, visant à :	
Vu la loi n° 90-29 du 1er décembre 1990, modifiée et complétée, relative à l'aménagement et l'urbanisme ;	— protéger les personnes et les biens contre les risques d'incendie et de panique ;	
Vu la loi n° 90-11 du 21 avril 1990, modifiée et complétée, relative aux relations de travail ;	— lutter contre l'incendie et à veiller à la sécurité des groupes d'intervention ;	
Vu la loi n° 99-01 du 19 Ramadhan 1419 correspondant au 6 janvier 1999 fixant les règles relatives à l'hôtellerie ;	— conserver la stabilité structurelle des constructions pendant une durée déterminée ;	
Vu la loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable ;	— réduire la propagation de l'incendie et à limiter la chaleur et la fumée y résultant ;	
Vu la loi n° 04-04 du 5 Joumada El Oula 1425 correspondant au 23 juin 2004, modifiée et complétée, relative à la normalisation ;	— limiter la propagation de l'incendie aux constructions voisines.	
Vu la loi n° 04-20 du 13 Dhou El Kaâda 1425 correspondant au 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable ;	Art. 2. — Toute étude, réalisation, aménagement ou modification des établissements, immeubles ou bâtiments à usage d'habitation, selon leur classement, doit respecter les normes et les mesures de sécurité propre à assurer la protection des personnes et des biens contre les risques d'incendie et de panique, conformément aux dispositions de la présente loi et des textes pris pour son application.	
Vu la loi n° 08-09 du 18 Safar 1429 correspondant au 25 février 2008 portant code de procédure civile et administrative ;	<i>Section 2</i>	
Vu la loi n° 11-10 du 20 Rajab 1432 correspondant au 22 juin 2011 relative à la commune ;	<i>Définitions</i>	
	Art. 3. — Il est entendu au sens de la présente loi par :	
	1- Incendie : combustion qui se développe sans contrôle dans le temps et dans l'entourage du feu.	
	2- Panique : situation qui se réalise lorsqu'un groupe de personnes, encloué dans un espace où surgit brutalement un risque imminent, réel ou imaginaire, se trouve pris, simultanément, par un émoi très violent, il se livre à des réactions involontaires qui le pousse à vouloir quitter, instantanément, le lieu.	

Annexe 2 : les données de simulation de fluide dans les deux cas étudiées

➤ Modèle amélioré : cas critique

Itérations	T de fluide (k)	I	T(k)	I	T(k)	I	T(k)	I	T(k)
1	562,089	42	452,158	83	377,811	124	340,787	165	318,490
2	562,086	43	448,979	84	376,714	125	340,108	166	318,076
3	562,083	44	445,966	85	375,641	126	339,438	167	317,652
4	562,080	45	443,127	86	374,574	127	338,785	168	317,241
5	562,076	46	440,531	87	373,474	128	338,127	169	316,832
6	562,066	47	437,988	88	372,442	129	337,487	170	316,429
7	562,025	48	435,501	89	371,363	130	336,840	171	316,032
8	561,757	49	433,041	90	370,340	131	336,216	172	315,643
9	559,854	50	430,673	91	369,288	132	335,589	173	315,262
10	551,658	51	428,238	92	368,267	133	334,981	174	314,885
11	550,705	52	425,821	93	367,241	134	334,384	175	314,507
12	549,518	53	423,486	94	366,277	135	333,791	176	314,135
13	548,419	54	421,303	95	365,293	136	333,187	177	313,771
14	547,324	55	419,198	96	364,350	137	332,603	178	313,408
15	546,287	56	417,101	97	363,378	138	331,983	179	313,052
16	545,118	57	414,994	98	362,442	139	331,406	180	312,707
17	543,879	58	413,060	99	361,451	140	330,832	181	312,353
18	542,382	59	411,127	100	360,487	141	330,275	182	312,007
19	540,549	60	409,339	101	359,539	142	329,712	183	311,669
20	538,596	61	407,572	102	358,612	143	329,164	184	311,330
21	535,676	62	405,841	103	357,684	144	328,608	185	310,998
22	532,659	63	404,106	104	356,807	145	328,066	186	310,674
23	529,757	64	402,403	105	355,904	146	327,529	187	310,350
24	526,459	65	400,785	106	355,022	147	327,006	188	310,035
25	523,551	66	399,260	107	354,146	148	326,477	189	309,730
26	518,771	67	397,768	108	353,322	149	325,965	190	309,404
27	514,683	68	396,343	109	352,456	150	325,442	191	309,068
28	510,162	69	394,897	110	351,633	151	324,937	192	308,726
29	505,660	70	393,546	111	350,781	152	324,434	193	308,408
30	500,834	71	392,173	112	349,957	153	323,942	194	308,082
31	495,512	72	390,893	113	349,118	154	323,450	195	307,779
32	491,378	73	389,571	114	348,319	155	322,966	196	307,460
33	487,344	74	388,312	115	347,515	156	322,491	197	307,148
34	483,449	75	387,045	116	346,716	157	322,025	198	306,844
35	479,900	76	385,849	117	345,916	158	321,555	199	306,539
36	476,818	77	384,624	118	345,158	159	321,100	200	306,251
37	471,710	78	383,498	119	344,4	160	320,645	201	305,976
38	467,052	79	382,340	120	343,633	161	320,201	202	305,691
39	462,586	80	381,187	121	342,911	162	319,760	203	305,426
40	458,932	81	380,072	122	342,176	163	319,334	204	305,152
41	455,373	82	378,926	123	341,488	164	318,909	205	304,897

La suite

I	T(k)	I	T(k)	I	T(k)
206	304,657	249	297,824	292	295,864
207	304,429	250	297,727	293	295,851
208	304,185	251	297,633	294	295,838
209	303,956	252	297,540	295	295,826
210	303,738	253	297,450	296	295,813
211	303,525	254	297,363	297	295,802
212	303,319	255	297,278	298	295,791
213	303,118	256	297,196	299	295,780
214	302,902	257	297,116	300	295,770
215	302,688	258	297,038		
216	302,479	259	296,964		
217	302,277	260	296,895		
218	302,085	261	296,826		
219	301,898	262	296,760		
220	301,716	263	296,698		
221	301,541	264	296,639		
222	301,369	265	296,582		
223	301,202	266	296,529		
224	301,038	267	296,480		
225	300,877	268	296,435		
226	300,719	269	296,394		
227	300,563	270	296,355		
228	300,412	271	296,320		
229	300,262	272	296,286		
230	300,118	273	296,254		
231	299,974	274	296,224		
232	299,835	275	296,196		
233	299,698	276	296,169		
234	299,564	277	296,143		
235	299,431	278	296,119		
236	299,301	279	296,096		
237	299,172	280	296,073		
238	299,047	281	296,052		
239	298,923	282	296,031		
240	298,803	283	296,011		
241	298,683	284	295,992		
242	298,567	285	295,974		
243	298,453	286	295,956		
244	298,343	287	295,939		
245	298,235	288	295,923		
246	298,129	289	295,907		
247	298,025	290	295,892		
248	297,923	291	295,878		

➤ **Modèle amélioré : cas d'ébullition**

Itérations	T de Fluide (k)	I	T(k)	I	T(k)	I	T(k)	I	T(k)
1	353,2977213	42	323,1442244	83	305,3911573	124	297,3673511	165	294,2692497
2	353,2969918	43	322,4606014	84	305,1172863	125	297,2422083	166	294,2373583
3	353,2962606	44	321,7998749	85	304,8499407	126	297,1177682	167	294,2069911
4	353,2955178	45	321,1702409	86	304,5811418	127	296,9992332	168	294,1780945
5	353,2946844	46	320,5623638	87	304,316448	128	296,8829044	169	294,1506273
6	353,2924979	47	319,9781894	88	304,0614227	129	296,7695759	170	294,1244478
7	353,2832655	48	319,4223795	89	303,809894	130	296,6576272	171	294,0995569
8	353,1382269	49	318,8852105	90	303,5672642	131	296,5483041	172	294,0759649
9	352,0629881	50	318,3456553	91	303,3248152	132	296,4406078	173	294,0536285
10	351,4794655	51	317,8090432	92	303,0864087	133	296,3365349	174	294,0325332
11	350,9268106	52	317,2953135	93	302,8508343	134	296,234808	175	294,0126906
12	350,2103749	53	316,7780671	94	302,6254154	135	296,1354822	176	293,9938659
13	349,4812968	54	316,2880296	95	302,4008379	136	296,03851	177	293,9763185
14	348,9196425	55	315,8001454	96	302,1872336	137	295,9455101	178	293,9598309
15	348,3969697	56	315,340179	97	301,9757511	138	295,8566009	179	293,9443874
16	347,6883105	57	314,8866361	98	301,7729067	139	295,7712547	180	293,9299377
17	347,0123785	58	314,4366242	99	301,5621833	140	295,6890394	181	293,9165064
18	346,3433727	59	313,9820461	100	301,3576553	141	295,6099165	182	293,9039176
19	345,6663372	60	313,5327055	101	301,157677	142	295,5329219	183	293,8921984
20	344,9864721	61	313,0975759	102	300,9608302	143	295,4582687	184	293,881019
21	343,9399359	62	312,6643729	103	300,7675679	144	295,3857115	185	293,8708185
22	342,98797	63	312,2429939	104	300,5790861	145	295,3147113	186	293,861529
23	341,9436679	64	311,8227324	105	300,3949352	146	295,2442113	187	293,8530703
24	340,9294243	65	311,404739	106	300,2104999	147	295,1753975	188	293,845262
25	339,850493	66	311,008895	107	300,0335193	148	295,1074787	189	293,8386612
26	338,4366415	67	310,607278	108	299,8556566	149	295,0413447	190	293,832145
27	337,3057	68	310,2249367	109	299,6767063	150	294,9768751	191	293,8264163
28	336,1695746	69	309,8474823	110	299,5013659	151	294,9148163	192	293,8210662
29	334,9723885	70	309,4784462	111	299,3265376	152	294,8544804	193	293,8164992
30	333,941958	71	309,1262739	112	299,154989	153	294,7965348	194	293,812066
31	332,5100696	72	308,7795803	113	298,9832983	154	294,7408147	195	293,8080854
32	331,3867065	73	308,4354529	114	298,8164212	155	294,6875948	196	293,8043599
33	330,2801858	74	308,1052296	115	298,6557389	156	294,6367746	197	293,8012525
34	329,2886277	75	307,7928968	116	298,4939582	157	294,5881247	198	293,7981321
35	328,4220228	76	307,4741929	117	298,3412651	158	294,5415267	199	293,7953736
36	327,5774837	77	307,1605091	118	298,1905961	159	294,4967156	200	293,7927318
37	326,7895058	78	306,8482501	119	298,0454393	160	294,4541547	201	293,7904604
38	326,0105342	79	306,5427751	120	297,8999389	161	294,4137945	202	293,7882104
39	325,2428311	80	306,2515695	121	297,7621925	162	294,3752352	203	293,786238
40	324,5200618	81	305,9620783	122	297,6269415	163	294,338057	204	293,7843347
41	323,8342615	82	305,6728015	123	297,4954687	164	294,3028099	205	293,782575

La suite

I	T(k)	I	T(k)	I	T(k)
206	293,7809583	248	293,7603167	290	293,7556654
207	293,7795052	249	293,7601548	291	293,7555642
208	293,7781917	250	293,7600052	292	293,7554253
209	293,7769766	251	293,759846	293	293,7553684
210	293,775876	252	293,7597122	294	293,7552931
211	293,7748679	253	293,7595596	295	293,7551652
212	293,7738774	254	293,7594336	296	293,7550649
213	293,7729586	255	293,759282	297	293,7549895
214	293,7720904	256	293,7591643	298	293,7548727
215	293,7713257	257	293,7590236	299	293,7547592
216	293,7705721	258	293,7589099	300	293,7545335
217	293,769903	259	293,7587771		
218	293,76926	260	293,7586664		
219	293,7686789	261	293,7585375		
220	293,7681237	262	293,7584313		
221	293,7676035	263	293,7583072		
222	293,7671155	264	293,7582142		
223	293,7666633	265	293,758096		
224	293,7662345	266	293,7580024		
225	293,7658333	267	293,7578823		
226	293,7654594	268	293,7577847		
227	293,765101	269	293,7576637		
228	293,7647679	270	293,7575678		
229	293,7644414	271	293,7574531		
230	293,7641442	272	293,7573624		
231	293,7638464	273	293,7572491		
232	293,763583	274	293,7571539		
233	293,7633144	275	293,7570335		
234	293,7630747	276	293,7569425		
235	293,762813	277	293,7568325		
236	293,7625932	278	293,756747		
237	293,7623396	279	293,7566465		
238	293,7621294	280	293,756562		
239	293,7619138	281	293,7564576		
240	293,7617272	282	293,7563761		
241	293,761522	283	293,7562722		
242	293,7613279	284	293,756183		
243	293,7611392	285	293,7560733		
244	293,7609736	286	293,7559989		
245	293,7607929	287	293,7559056		
246	293,7606395	288	293,7558322		
247	293,7604611	289	293,7557357		

➤ **Modèle simple : cas critique**

Itérations	T de Fluide (k)	I	T(k)	I	T(k)	I	T(k)	I	T(k)
1	561,5078202	42	514,0687381	83	412,39528	124	369,5982806	165	355,9950465
2	560,9582283	43	510,4572715	84	410,8375581	125	369,0083088	166	355,8565147
3	560,4347992	44	506,8482375	85	409,3118012	126	368,4352873	167	355,7237119
4	560,023674	45	503,3341818	86	407,8146002	127	367,8785528	168	355,5964371
5	559,7019594	46	499,8348771	87	406,3466788	128	367,3380647	169	355,4744854
6	559,3758632	47	496,3990122	88	404,9082734	129	366,8133292	170	355,3576641
7	559,1164806	48	493,0211643	89	403,5005032	130	366,3041084	171	355,2457709
8	558,8689402	49	489,7042731	90	402,1209867	131	365,809991	172	355,1386021
9	558,62381	50	486,4523088	91	400,7681291	132	365,3308933	173	355,0360641
10	558,378751	51	483,2635239	92	399,4424254	133	364,866203	174	354,9378205
11	558,0124782	52	480,1233657	93	398,1436893	134	364,4159011	175	354,8438762
12	557,6458465	53	477,0589222	94	396,8693838	135	363,9795327	176	354,7539173
13	557,2802511	54	474,086399	95	395,6221668	136	363,5568663	177	354,6678793
14	556,9146848	55	471,1808883	96	394,4006658	137	363,1477294	178	354,585644
15	556,5497718	56	468,3414445	97	393,2062556	138	362,7516444	179	354,5069618
16	556,0024095	57	465,577392	98	392,0331889	139	362,3685221	180	354,4317495
17	555,4572718	58	462,8831323	99	390,8838621	140	361,9978566	181	354,35985
18	554,9129637	59	460,2684567	100	389,7599284	141	361,6394915	182	354,2911478
19	554,3704691	60	457,7321818	101	388,6610171	142	361,293008	183	354,2255043
20	553,8287547	61	455,2718261	102	387,586341	143	360,9582822	184	354,1627659
21	553,01954	62	452,8637685	103	386,5356302	144	360,63488	185	354,1028305
22	552,2113903	63	450,5058554	104	385,5088661	145	360,3225778	186	354,0455516
23	551,4064786	64	448,2147288	105	384,5049759	146	360,0210915	187	353,9908486
24	550,6016614	65	445,9800783	106	383,5249697	147	359,7300762	188	353,9386038
25	549,7990004	66	443,8025082	107	382,5690665	148	359,4492406	189	353,8887122
26	548,5929459	67	441,6628639	108	381,6369171	149	359,178207	190	353,8410794
27	547,3890816	68	439,5618297	109	380,727464	150	358,9168852	191	353,7955918
28	546,1851884	69	437,4954682	110	379,84096	151	358,6649414	192	353,752192
29	544,9830742	70	435,4768142	111	378,9765231	152	358,4222222	193	353,7108006
30	543,7797859	71	433,4952605	112	378,1331947	153	358,1884871	194	353,6713417
31	541,9743054	72	431,5587224	113	377,3119162	154	357,9634398	195	353,6337312
32	540,1695053	73	429,6472324	114	376,5117081	155	357,7467997	196	353,5979067
33	538,3651443	74	427,7716515	115	375,7322511	156	357,538335		
34	536,5671841	75	425,9375698	116	374,9735081	157	357,3377457		
35	534,7613937	76	424,1310421	117	374,234346	158	357,1448855		
36	532,0758691	77	422,3581409	118	373,5150833	159	356,9596237		
37	529,4082393	78	420,6233012	119	372,8153347	160	356,7818218		
38	526,7715979	79	418,9182862	120	372,1350349	161	356,6111541		
39	524,1492286	80	417,2425804	121	371,4733332	162	356,4473461		
40	521,539801	81	415,5940241	122	370,8304773	163	356,2902237		
41	517,7625945	82	413,9773869	123	370,2052964	164	356,1395481		

➤ **Modèle simple** : cas d'ébullition

Itérations	T de Fluide (k)	I	T(k)	I	T(k)	I	T(k)
1	353,2706053	43	353,0842438	85	352,9148173	126	352,8984028
2	353,2594997	44	353,0750821	86	352,9138564	127	352,898337
3	353,2560629	45	353,0662826	87	352,9129345	128	352,8982842
4	353,2525749	46	353,0577987	88	352,9120579	129	352,8982351
5	353,2498564	47	353,0496489	89	352,9112212	130	352,8981953
6	353,2471202	48	353,0418053	90	352,9104306	131	352,8981589
7	353,2451257	49	353,0342831	91	352,909679	132	352,8981331
8	353,2433952	50	353,0270792	92	352,9089706	133	352,8981086
9	353,2416856	51	353,0202107	93	352,9082927	134	352,898095
10	353,2401945	52	353,0136815	94	352,9076548	135	352,8980841
11	353,2383314	53	353,0074951	95	352,9070448		
12	353,2367476	54	353,0016268	96	352,9064692		
13	353,2351889	55	352,9960319	97	352,9059231		
14	353,2337159	56	352,9907372	98	352,9054092		
15	353,2321862	57	352,9856776	99	352,9049228		
16	353,2299743	58	352,9808596	100	352,9044593		
17	353,2277832	59	352,9762657	101	352,9040182		
18	353,2255825	60	352,971883	102	352,9035947		
19	353,223384	61	352,9676978	103	352,903192		
20	353,2212531	62	352,9637082	104	352,9028098		
21	353,2180373	63	352,959907	105	352,9024465		
22	353,2149118	64	352,9562952	106	352,902105		
23	353,2117058	65	352,952867	107	352,901781		
24	353,2085702	66	352,9496225	108	352,9014801		
25	353,2053826	67	352,9465627	109	352,9011984		
26	353,2006794	68	352,9436691	110	352,900936		
27	353,1960216	69	352,9409245	111	352,9006895		
28	353,1914654	70	352,9383383	112	352,9004584		
29	353,1870022	71	352,9359216	113	352,9002354		
30	353,1826279	72	352,9336729	114	352,9000272		
31	353,1762772	73	352,931578	115	352,8998315		
32	353,1701283	74	352,9296266	116	352,8996415		
33	353,1641723	75	352,9278119	117	352,8994681		
34	353,1583947	76	352,9261163	118	352,8993011		
35	353,1527504	77	352,924532	119	352,899152		
36	353,1445539	78	352,9230597	120	352,8990069		
37	353,1366051	79	352,9216687	121	352,8988761		
38	353,1288575	80	352,9203766	122	352,898758		
39	353,1213099	81	352,9191464	123	352,8986532		
40	353,1139468	82	352,9179884	124	352,8985589		
41	353,103614	83	352,9168786	125	352,8984744		
42	353,0937406	84	352,9158279				