



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

Etude des propriétés d'inflammabilité

Présenté et soutenu par :

MESSAOUDU Hadj Djillali

et

MEBARKI Sofiane

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
TALBI Zahera	MAA	IMSI	Président
SERAT Fatima Zohra	MCB	IMSI	Encadreur
MECHKEN Amel	MAA	IMSI	Examineur

Année 2020/2021

Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chère frères et sœurs pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille

A mon binôme « Hadj Djillali » pour son soutien et surtout sa patience avec moi,

Sofiane

Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chère frères et sœurs pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille

A mon binôme « Sofiane » pour son soutien et surtout sa patience avec moi,

Hadj Djillali

Remerciements

*Avant tout, nous remercions **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la force et la foi pour accomplir ce travail, **ELHAMDOULI' ALLAH**.*

*On tient à exprimer toute notre reconnaissance et gratitude à notre encadreur **Mm.SERAT Fatima Zohra**. On le remercie de nous avoir encadrés, orientés, aidés et conseillés et pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.*

*Nous tenons aussi à remercier notre co-encadreur monsieur **GUETARNI Islam Hadi Mohamed** pour son aide et ces précieuses conseils.*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury **Mm.TALBI Zahera** et **Mm. MECHKEN Amel** d'avoir accepté d'évaluer notre travail.*

On voudrait exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apportés leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

Résumé

Le bac de stockage des produits inflammables et explosifs est l'une des lieux de distributions où les scénarios les plus catastrophiques sont présents. Cependant, la conscience de ces scénarios est primordiale afin de garantir une totale maîtrise de ces zones, et réduire la gravité et la fréquence d'occurrence de ces scénarios catastrophiques. Dans ce mémoire, nous avons établi une analyse des risques sur le bac de stockage d'essence de NAFTAL en utilisant une analyse quantitative des risques par la méthode Arbre de Défaillance ADD où cette méthode nous a permis de définir l'interaction entre la criticité des événements et leurs impacts sur l'indisponibilité du système, par la suite procédé d'un diagramme Ishikawa de clarifier les causes et les conséquences des explosions et l'incendie. Puis une modélisation des conséquences engendrées par des scénarios pouvant touchés le bac de stockage des produits inflammables. Les résultats de cette étude nous ont permis de proposer des recommandations sous forme d'un document relatif à la protection contre les explosions dans le bac et ces accessoires.

Mots clé : Propriétés d'inflammabilités, ADD, ISHIKAW, Phaste, bac de stockage.

Abstract

The storage bin of flammable and explosive products is one of the distribution places where the most catastrophic scenarios are present. However, awareness of these scenarios is essential in order to guarantee full control of these areas, and to reduce the severity and frequency of occurrence of these catastrophic scenarios. In this thesis, we established a risk analysis on the NAFTAL gasoline storage tank using a quantitative risk analysis by the ADD Failure Tree method where this method allowed us to define the interaction between the criticality of events and their impact on the unavailability of the system, then proceeded with an Ishikawa diagram in order to clarify the causes and consequences of explosions and fire. Then modeling of the consequences generated by scenarios that may affect the storage tank for flammable products. The results of this study have enabled us to propose recommendations in the form of a document relating to protection against explosions in the tank and these accessories.

Keywords: Flammability properties, ADD, ISHIKAWA, Phaste, storage bin.

Liste des abréviations

Listes des abréviations

CG : Contribution de Groupe

CMO : Concentration Maximum en Oxygène

COC : Coupe Ouverte de Cleveland

LSI : Limite Supérieur d'Inflammabilité

LII : Limite Inférieure d'Inflammabilité

OMP : Opérateur Mouvement Produit

Ppm : Partie par million

QSPR : Quantitative Structure-Property Relationship

SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition

SGH : Système Général Harmonisé

SMILES : Simplified Molecular Input Line Entry Specification

TAI : Température d'Auto-Inflammation

TDA : Terminal Départ Arzew

VMP : Vitesse Maximale de montée en Pression

Glossaire

Glossaire

Etat gazeux : se caractérise par une liaison entre les molécules du gaz quasiment nulle, une substance gazeuse ne possède ni volume propre ni forme propre : un gaz prend la forme du récipient qui le contient et occupe tout l'espace disponible.

Le volume d'un gaz peut être diminué : un gaz est compressible.

Le volume d'un gaz peut être augmenté : un gaz est expansible.

L'évaporation : est le passage de l'état liquide à l'état gazeux qui s'effectue à la surface du liquide sans ébullition.

Une substance inflammable : Une substance sous forme de gaz ou de vapeur est inflammable lorsqu'elle est capable de subir une réaction exothermique avec l'air après inflammation, et elle permet la propagation d'une flamme. Selon le décret exécutif n 07-144 Une substance inflammable est une substance ou préparations liquides, dont le point d'éclair est égal ou supérieur à 21°C et inférieur ou égal à 55°C.

Mélanges inflammables : un mélange gazeux est inflammable lorsqu'il est constitué d'un gaz carburant ou d'un mélange de gaz carburants et d'un gaz comburant.

Sécurité positive : Système de sécurité qui permet à une machine, un appareil, de fonctionner sûrement alors qu'un problème est survenu.

Système SCADA : Un système de contrôle et d'acquisition de données en temps réel est un système de télégestion à grande échelle permettant de traiter en temps réel un grand nombre de télémesures et de contrôler à distance des installations techniques.

Logiciel PHAST : PHAST est un logiciel de simulation de dispersion dans l'air. Il est employé pour modéliser des écoulements dans l'air à des fins d'études écologiques ou de sécurité industrielle.

Jet Fire : jet fire ou les feux torche sont la conséquence de fuites de fluides inflammables, qui produisent au contact d'une source d'inflammation des jets enflammés à fort pouvoir calorifique. Ces flammes sont potentiellement dévastatrices et risquent par surcroît de propager un incendie.

Glossaire

Pool Fire : Un Pool Fire est un type de flamme de diffusion où une couche de combustible liquide volatil s'évapore et brûle. La couche de combustible peut être soit sur un substrat solide horizontal, soit flottant sur un liquide de densité plus élevée, généralement de l'eau.

Flash Fire : Un Flash Fire ou feu éclair est un incendie soudain et intense provoqué par l'inflammation d'un mélange d'air et d'une substance inflammable dispersée telle qu'un liquide solide, inflammable ou combustible, ou un gaz inflammable.

Table des matières

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Listes des abréviations	
Glossaire	
Listes des figures	
Listes des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité	2
Introduction	2
Les propriétés d'inflammabilité.....	2
Point d'éclair	2
Point d'inflammation	4
Température d'auto-inflammation	5
Revue sur les méthodes d'estimation des propriétés d'inflammabilités [2]	6
Caractéristiques des mélanges inflammables et explosives [4] [5] [6]	12
Gaz et vapeurs	12
Poussières combustibles.....	23
Les zones classées et leurs exigences	30
Déférénts types des zones	30
Cadre règlementaire sur les composés chimiques dangereux (inflammables)	32
Règlementation algérienne.....	32
Législation européenne concernant l'ATEX.....	36
Chapitre 02 : Présentation du groupe NAFTAL	39
Introduction	39

Table de matière

Missions principales de l'entreprise NAFTAL	39
Branche Carburant de NAFTAL.....	39
Missions principales du District Carburants	39
Infrastructures de la Branche Carburants.....	40
Le District Carburant Oran comprend deux (2) dépôts Carburants Terre	40
Présentation de dépôt CDS 317 « PETIT- LAC ».....	40
Situation géographique	40
Les installations du Centre CDS 317 PETIT LAC	41
Organigramme du Centre Carburant Petit-lac	42
Service Exploitation.....	42
Zone de réception.....	45
Zone de stockage.....	45
Zone de pomperie.....	47
Postes de chargement	48
Possibilité de formation d'une ATEX dans le système étudié	48
ATEX possible en zone 0	48
ATEX possible en zone 1	48
ATEX possible en zone 2	48
Exemples de zones classées au sein de système étudié	49
Les bacs de stockage	49
Poste de chargement	49
Chapitre 03 : Analyse du risque des produits inflammable dans un bac de stockage	52
Introduction	52
Arbre de défaillances (ADD).....	52
Objectif	52
Mise en œuvre de la méthode	52
REPRESENTATION GRAPHIQUE.....	53

Table de matière

Méthode d'Ishikawa (cause-effet)	57
Synthèse des résultats ADD et Ishikawa	59
Quantification de la sévérité de potentielle danger par logiciel PHAST	59
Les données de la modélisation	59
Rapport de synthèse des conséquences	59
Synthèse de la simulation.....	65
Chapitre 04 : Mise en place des barrières de sécurité	66
Introduction	66
Mesures de prévention et de protection	66
Éviter la formation d'une Atex	66
Éviter l'inflammation des ATEX formées	66
Limitation des effets des explosions de gaz et de vapeurs.....	69
Le document relatif à la protection contre les explosions (DRPCE).....	70
Hiérarchisation des risques	70
Probabilité de réalisation du risque d'explosion.....	70
Exposition	71
Gravité.....	71
Evaluation du niveau de criticité du risque d'explosion.....	72
Conclusion générale	77
Annexes	78
Annexe 1 : caractéristiques d'explosivité des principaux gaz et vapeurs inflammables	78
Annexe 2 : Caractéristiques d'inflammabilité des poussières	83
Annexe 3: Adéquation et marquage des appareils ATEX	86
Annexe 4: Mode de protection des appareils électriques et non électrique.....	87
BIBLIOGRAPHIE	91

Listes des figures

Figure 1 : Domaine d'explosivité.....	12
Figure 2 : Limites d'inflammabilité des mélanges hydrogène / air en fonction de la température initiale.....	15
Figure 3 : Influence de la température initiale sur les limites d'inflammabilité de l'hydrogène dans l'air (propagation d'une flamme descendante) à pression atmosphérique.....	16
Figure 4 : Comparaison des limites d'inflammabilité des mélanges H ₂ /air/H ₂ O vapeur de la littérature pour différentes conditions initiales.....	21
Figure 5 : Limites d'inflammabilité des mélanges H ₂ /air/H ₂ O initialement à 100 kPa et 100°C pour différents pourcentages de vapeur d'eau dans le mélange.....	21
Figure 6 Energie minimale d'inflammation de mélanges hydrogène-air en fonction de la teneur en hydrogène dans le milieu pour différentes pressions initiales et à température ambiante	23
Figure 7 Hexagone d'explosion des poussières	25
Figure 8 Influence du diamètre moyen des particules d'aluminium pulvérisé sur les caractéristiques d'explosivité et d'explosion (d'après l'US Bureau of Mines).....	27
Figure 9 : Localisation géographique de NAFTAL	41
Figure 10 : Organigramme de l'entreprise.....	42
Figure 11 Schéma synoptique de fonctionnement du centre CDS Oran petit lac.	43
Figure 12 : Terminal départ Arzew	44
Figure 13 : Schéma des quatre (4) zones constituant le Centre Petit lac 317.....	44
Figure 14 : Identification des différentes zones de stockage sur plan masse.....	46
Figure 15 : Modélisation 2D d'une dispersion des vapeurs inflammable autour d'un orifice	49
Figure 16 : Identification 2D des zones classées autour d'un bac à toit flottant	49
Figure 17: Vu de dessus de la zone type 1 autour d'un poste de chargement.....	50
Figure 18 : Vu transversale de la Zone type 1 autour d'un poste de chargement	50
Figure 19 : Vu transversale de la zone type 2 autour d'un poste de chargement	50
Figure 20: Représentation des événements	53
Figure 21: Représentation des portes	54
Figure 22: Représentation des transferts ou renvois	55
Figure 23 L'effet maximal de dispersion de vapeur engendré par une rupture	60
Figure 24 La distance atteinte par le feu de flash.....	61
Figure 25 : Explosion du nuage de vapeur causé par une rupture.....	61

Table de matière

Figure 26 Graphe montre la surpression engendrée par une rupture catastrophique	62
Figure 27 :Distance atteintes par les radiations de jet enflammé	63
Figure 28: Early Pool Fire produite par une fuite	63
Figure 29 :L'effet thermique d'un feu de nuage inflammable	64
Figure 30 : Explosion du nuage de vapeur causé par une fuite	64

Listes des tableaux

Tableau 1 : Les valeurs numériques des paramètres ajustables	10
Tableau 2 : Valeurs de contribution des groupes	10
Tableau 3 : Classification des liquides	13
Tableau 4 Caractéristiques d'inflammabilité de quelques gaz et vapeurs dans l'air et dans l'oxygène	17
Tableau 5 Concentrations maximales d'oxygène (% du volume) interdisant l'inflammation d'un mélange contenant des gaz ou des vapeurs inflammables, de l'air et de l'azote ou du dioxyde de carbone ajouté pour rendre inerte ce mélange (à températures et pressions ordinaire)	19
Tableau 6 Vitesse de sédimentation	26
Tableau 7 Catégories de poussières	28
Tableau 8 :Les Zones ATEX [18]	30
Tableau 9 : Distance sous le vent pour des concentrations définies	60
Tableau 10 : Distance maximal à la fraction LFL n'importe quel auteur	60
Tableau 11 : distance maximale de surpression	62
Tableau 12 : L'intensité de radiation de jet enflammé	62
Tableau 13 : distance maximale de surpression	65
Tableau 14 : probabilité de présence d'une atmosphère explosive	71
Tableau 15 : probabilité de présence d'une source d'inflammation	71
Tableau 16: Niveau de la gravité d'exposition.....	71
Tableau 17 : Niveau de gravité	71
Tableau 18 :Niveau de criticité	72

Introduction générale

Des accidents industriels peuvent survenir et entraîner des conséquences graves pour le personnel de l'installation, les populations, les biens et l'environnement. Ils peuvent se transformer en véritables catastrophes, même si les progrès qu'ont connus les sciences dans les différents domaines permettent, aujourd'hui, d'en atténuer les effets aussi bien pour les personnes que pour les bâtiments et infrastructures ses effets et ses conséquences dépendent de la nature des produits stockés et de la quantité distribuée et commercialisée, il se manifeste le plus souvent par un incendie, une explosion, un nuage toxique.

En effet, l'occurrence d'accidents majeurs survenus dans le domaine pétrolier à travers le monde, est la preuve que le risque est omniprésent, ceci nécessite une approche globale, permettant, sur la base de l'analyse du retour d'expérience, d'enrichir la réflexion, déjà entamée sur les moyens les plus efficaces à mettre en œuvre tant au stade de la prévention que ceux de la gestion des urgences et de la planification de secours.

Les bacs de stockages sont les principaux moyens de stockage des hydrocarbures, dans les centres de distribution avant la commercialisations et distribution de ces derniers. La zone de stockage du dérivé de pétrole (essence, gasoil...) avec ces installations est l'une des zones où les scénarios catastrophiques (les incendies, les phénomènes de BLEVE (vaporisation violente à caractère explosif), explosions, ainsi que les effets domino) sont plus retendus à cause de la présence des substances inflammables.

Cela étant, nous avons opté pour un plan de travail scindé en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les propriétés d'inflammabilité et les composés inflammable et explosifs d'un part et à traiter la réglementation nationale et internationale qui régit ce domaine d'un autre part.

Le deuxième chapitre, une présentation du groupe NAFTAL et à l'étude des de bac de stockage d'essence du centre CDS 317 de Petit Lac d'Oran.

Le troisième chapitre dédiée à l'analyse du risque des produits inflammable dans un bac de stockage des hydrocarbures dans le but de dégager des politiques de prévention et de gestion des risques pour la protection de l'environnement et de la santé.

Dans le quatrième chapitre une mise en place des barrières de sécurité. Et on terminera notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

I-1 Introduction

Les matières inflammables ont plusieurs caractéristiques différentes qui peuvent être utilisées pour définir leur niveau de danger en termes d'inflammabilité et d'explosivité. Étant donné qu'aucune caractéristique ne peut définir de manière adéquate le niveau de risque pour une substance particulière, elles doivent être évaluées en tant que synergie. Ces caractéristiques ont toutes été testées dans des conditions de laboratoire et des procédures strictes qui peuvent changer lorsqu'elles sont appliquées à des environnements industriels. Les principales caractéristiques des matières inflammables, qui présentent un grand intérêt pour les incendies et les explosions, sont décrites dans ce chapitre.

I-2 Les propriétés d'inflammabilité

I-2-1 Point d'éclair

Définition :

La température de point d'éclair est la température minimale à laquelle un combustible liquide émet assez de vapeurs pour permettre une courte inflammation en présence d'une flamme. Les vapeurs s'enflamment et s'éteignent aussitôt. Cette donnée est fondamentale pour évaluer l'inflammabilité d'un liquide et son classement selon les critères du Système Général Harmonisé (SGH) de Classification et d'étiquetage de produits chimiques.

L'utilité des tests de point d'éclair :

La connaissance de ce point nous permet de :

- ✓ Évaluation des risques pour la sécurité des liquides et semi-solides, y compris leur inflammabilité
- ✓ Classer ces matériaux en fonction de ces résultats.
- ✓ Pour évaluer le risque d'inflammabilité, l'analyse du point d'éclair est une méthode efficace et efficiente.
- ✓ Essentiellement, plus la température du point d'éclair d'une substance est basse, plus son risque d'inflammabilité n'est élevé.
- ✓ En classant les matériaux en fonction de ce risque, cela permet leur utilisation et leur stockage corrects et sûrs.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

- ✓ S'il y a un changement de point d'éclair dans un matériau, cela peut indiquer qu'il contient des contaminants qui pourraient être volatils. Parfois, un matériau est frelaté par un autre, et le test du point d'éclair l'expose également.

Méthode d'essai pour déterminer le point d'éclair :

Mesure du point d'éclair en vase ouvert :

La méthode en vase ouvert (open cup) Cleveland (COC) est la plus courante. Pour le test du point d'éclair utilise un récipient, ou un conteneur, qui est exposé à l'air extérieur.

Une fois que l'échantillon est placé dans le récipient, vous augmentez progressivement sa température et passez une source d'inflammation dessus, jusqu'à ce qu'il clignote et s'enflamme à un certain point. Il s'agit du point d'éclair de l'échantillon.

La méthode en vase ouvert pour les tests éclair a été développée pour évaluer les dangers potentiels en cas de déversements de liquides. En tant que méthode, le test en vase ouvert est moins précis que le test en vase clos, car les vapeurs sont libres de s'échapper dans l'atmosphère et peuvent être affectées par les conditions locales.

Les résultats du point d'éclair de cette méthode peuvent également être plus élevés à des températures supérieures à la température ambiante en raison de la concentration réduite de vapeurs par rapport aux méthodes en vase clos.

Mesure du point éclair en vase fermé :

Dans la méthode du vase fermé (closed cup), l'essai est effectué à l'aide d'un récipient isolé de l'atmosphère extérieure. Le conteneur et l'échantillon sont ensuite chauffés, simulant l'effet de l'introduction accidentelle d'une source d'inflammation dans un conteneur fermé, tel qu'un réservoir de gaz ou un autre conteneur de stockage. Cette approximation étroite des conditions réelles et de la nature exacte des tests rend la méthode de la section fermée idéale pour les spécifications et réglementations des produits.

Les tests en vase fermé produiront généralement moins de points d'éclair car la chaleur contenue est susceptible de rendre le matériau de l'échantillon inflammable à un stade précoce.

Cette interprétation de mauvais résultats tend à rendre les méthodes en vase fermé préférées par les normes de l'industrie.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Il s'agit de la méthode courante pour tester les points d'incendie et d'éclair de tous les produits pétroliers dont le point d'éclair est supérieur à 79 °C.

Il existe quatre méthodes principales pour tester un point d'éclair fermé : Pensky Martens, Abel, Tag et Setaflash.

I-2-2 Point d'inflammation

C'est la température à laquelle les vapeurs sont émises en quantité suffisante pour alimenter la combustion. Il y a non seulement allumage, mais continuation de la combustion. Le renvoi par la flamme d'une partie de son rayonnement vers la surface du liquide est suffisant pour entretenir un régime de combustion avec flamme jusqu'à épuisement du combustible. Le point d'inflammation se situe, de quelques degrés à quelques dizaines de degrés, au-dessus du point d'éclair. Il a peu d'utilisation pratique.

Les limites d'inflammabilité (inférieure et supérieure) :

Définition :

La limite inférieure d'inflammabilité (LII) [en anglais : lower flammability limit (LFL)] appelée aussi LIE (Limite Inférieure d'explosivité) est la plus faible concentration d'un gaz ou d'une vapeur dans l'air susceptible de produire un éclair et de s'enflammer en présence d'une source d'inflammation. Elle s'exprime en % volume.

La limite supérieure d'inflammabilité (LSI) [en anglais : upper flammability limit (UFL)] appelée aussi LSE (Limite Supérieure d'explosivité) est la concentration maximale d'un gaz ou d'une vapeur dans l'air au-dessus de laquelle la flamme ne se propage pas en présence d'une source d'ignition. Elle s'exprime en % volume

L'utilité de la détermination des limites d'inflammabilité :

Le test des limites d'inflammabilité permet une évaluation précise de la température à laquelle il y a suffisamment de vapeur pour la propagation de la flamme et permet de concevoir la marge de sécurité correcte.

La détermination de ces limites fournira non seulement une compréhension des risques potentiels pour la sécurité présente lors du fonctionnement dans certaines conditions, mais fournira également des informations utiles sur la façon d'exploiter en toute sécurité un processus en dehors de la zone inflammable. Parfois, il n'est pas toujours rentable d'exploiter des processus à grande échelle dans un environnement entièrement inerte ; Par conséquent, la

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

connaissance des limites d'inflammabilité peut offrir une certaine flexibilité sur les opérations du procédé.

Méthode d'essai pour déterminer les limites d'inflammabilité :

Les mesures sont effectuées dans une sphère en verre d'un volume de 5,2 ou 12,3 dm³. Une alimentation haute tension (15kV) est utilisée pour générer une source d'ignition continue de haute énergie (arc électrique). La sphère est équipée d'un agitateur magnétique pour agiter l'échantillon et favoriser la vaporisation de la substance, avec enregistrement vidéo pour observer la propagation de la flamme. Aux limites des tests d'inflammabilité, une seule image vidéo peut être suffisante pour détecter une flamme de combustion.

Une fois la température désirée atteinte, le volume requis de substance est introduit dans la sphère par le contrôle de la pression partielle. L'échantillon est alors agité pendant 5 minutes jusqu'à équilibre thermique et vaporisation totale. L'agitation est arrêtée et un arc électrique est généré entre les électrodes sur une durée de 0,2 à 0,4 seconde. Les tests LII sont lancés à une concentration inférieure Le matériau est ensuite augmenté par incréments de 1% jusqu'à ce que l'allumage soit observé et la LII définie. Et les tests LSI sont lancés à une concentration supérieure Le matériau est ensuite diminué par incréments de 1% jusqu'à ce que l'inflammation soit observée et que la LSI soit définie. Entre chaque test, la sphère est vidée, et un cycle de dépression et retour à pression atmosphérique est répété à trois reprises pour s'assurer de l'absence de vapeurs résiduelles ou produits de décomposition. Les résultats sont donnés en pourcentage du volume de vapeur par volume d'air.

I-2-3 Température d'auto-inflammation

Définition :

La température d'auto-ignition d'une substance est la température minimale à partir de laquelle elle s'enflamme spontanément en l'absence de source d'inflammation externe, telle qu'une flamme ou une étincelle ;

L'utilité de test de température d'auto-inflammation :

- ✓ La température d'auto-inflammation est utilisée pour spécifier des procédures de fonctionnement, de stockage et de manipulation sécuritaires pour les usines de traitement fonctionnant à température élevée.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

- ✓ Peut être utilisé dans l'évaluation du risque d'incendie car cette méthode d'essai mesure la tendance de l'éprouvette à soutenir une combustion prolongée.

Méthode d'essai pour déterminer la température d'auto-inflammation :

Cette méthode d'essai n'est pas conçue à mesurer la température d'auto-inflammation de matériaux solides ou liquides à la température d'essai, mais elle peut être utilisée pour déterminer la température d'auto-inflammation des produits chimiques solides qui fondent et se vaporisent facilement à des températures inférieures à la température d'essai. Les tests sont effectués dans un ballon de borosilicate Erlenmeyer de 500 ml qui est uniformément chauffé dans un four spécialement conçu à cet effet. Un thermocouple fin à l'intérieur du ballon est utilisé pour surveiller les changements de température qui se produisent lorsqu'une petite quantité d'échantillon de test est injectée dans le ballon rempli d'air. La température la plus basse pour laquelle une auto-inflammation est observée pour plusieurs volumes injectés est la TAI. Le délai entre l'injection et l'inflammation est mesuré. La température du ballon d'essai est progressivement abaissée jusqu'à ce que l'allumage ne se produise pas. Le test est répété 10 fois pour confirmer que la température d'auto-inflammation la plus basse a été trouvée. La température du point de feu est généralement supérieure à la température du point d'éclair.[1].

I-2-4 Revue sur les méthodes d'estimation des propriétés d'inflammabilités [2]

Vue que les méthodes d'essai expérimental ont beaucoup des contraintes comme le coût élevé et les propriétés intrinsèques de ces produits (la toxicité, l'inflammabilité, ...) qui peuvent mettre la santé et la sécurité des personnes en danger. Cependant, il est nettement plus intéressant de disposer des méthodes permettant de les obtenir par un calcul prédictif.

Dans la littérature, différents modèles ont été présentés pour la prédiction des propriétés d'inflammabilités (points d'éclair, températures d'auto-inflammation, limites d'inflammabilités) de composés organiques purs et des mélanges. Ces modèles peuvent être classés en trois grandes catégories : les modèles de contribution de groupe (GC), les modèles relation quantitative structure à activité (QSPR ; quantitative structure-property Relationship) et les corrélations empiriques.

Dans notre sujet on a choisi l'approche de contributions des groupes parce qu'elle est plus convaincante en matière de la simplicité et de la précision que les autres approches. Cette

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

approche ne nécessite pas de logiciel spécialisé à mettre en œuvre, ceci lui donne l'avantage d'être simple facile et très rapide.

Modèles empiriques

Les corrélations ou modèles empiriques sont largement utilisés pour la modélisation des propriétés d'inflammabilités (limite d'inflammabilité inférieure et supérieure, le point d'éclair et la température d'auto-inflammation), ce modèle nécessite au moins une des autres propriétés physico-chimiques comme entrée du modèle telles que le point d'ébullition normal la densité, la pression de vapeur, les propriétés critiques et l'enthalpie de vaporisation, ...

La précision de ces types de corrélations empiriques dépend directement de la précision des autres propriétés physico-chimiques et des méthodes numériques utilisées pour leurs développements. Également, ces corrélations empiriques peuvent inclure certains inconvénients. Par exemple, si seulement une des propriétés précitées n'est pas disponible, il n'est pas possible d'estimer une propriété d'inflammabilité.

Méthodes de Relation Quantitative Structure à Propriété (QSPR)

L'approche Relation Quantitative Structure à Propriété (en anglais : Quantitative structure-property relationship ou QSAR) est largement utilisée dans le domaine de la prédiction des propriétés physico-chimiques, thermodynamiques et même pour l'estimation des propriétés d'inflammabilités. Le QSPR est une approche pour trouver des relations mathématiques quantitatives entre la structure moléculaire intrinsèque et les propriétés observables des composés chimiques.

Méthodes de contributions de groupes

Les méthodes de contributions des groupes, appelées aussi méthodes additivités des groupes sont des méthodes prédictives pour calculer des propriétés physico-chimiques des composés organiques. Ces méthodes sont régulièrement sollicitées. Elles permettent un calcul rapide et simple de différentes grandeurs thermodynamiques de substances pures ou de mélanges.

Principe de base

On rassemble sous le terme de « méthodes de contribution de groupes » l'ensemble des méthodes prédictives permettant d'évaluer une propriété quelconque en sommant des contributions relatives à des fragments de molécules.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Les méthodes de contributions des groupes nécessitent principalement des groupes tabulés (fragments moléculaires) où l'on suppose que la valeur de la propriété d'une molécule est fonction de la contribution de tous les groupes constituant la molécule et que la valeur de la propriété de n'importe quel groupe a la même contribution dans toutes les molécules. De plus, l'approche de contribution de groupe ne nécessite pas de logiciel spécialisé (simple procédure de calcul des groupes à partir du SMILES d'une structure chimique) et présente l'avantage d'être très rapide, simple et facile à appliquer sans nécessiter de la puissance de calcul importante.

Hierarchie des groupes

Méthode de fragmentation d'ordre 0

Ce genre de découpages touche la composition élémentaire de la molécule, il consiste de citer le nombre des atomes constituant ce composé ; alors une propriété est ainsi considérée comme étant une somme de contributions atomiques.

Méthode de fragmentation d'ordre 1

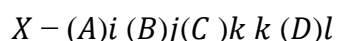
La fragmentation d'ordre un, consiste à donner le nombre de groupe qui composent la molécule, sans prendre en considération l'entourage de ce groupe. À titre d'exemple, ce groupe peut être C , CH , CH_2 , CH_3 . Les contributions (valeurs des paramètres) correspondent à ces groupes sont les mêmes et ne change pas avec le changement de leur entourage, c'est-à-dire un groupe de CH_2 au voisinage de la fonction alcool (OH) est similaire à celle qui est entouré par des groupes de carbone (C , CH , CH_2 , CH_3). Les méthodes utilisant les contributions de groupes de premier ordre sont assez souvent employées vu qu'ils unissent à la fois la relative simplicité et une précision satisfaisante. Cependant, il est indispensable de souligner que certaines de ces méthodes ne sont pas fiables. En effet, l'estimation des enthalpies (grandeurs indispensables dans les études et les simulations de procédés) par des méthodes utilisant une fragmentation d'ordre 1, a souvent été remise en cause.

Méthode de fragmentation d'ordre 2

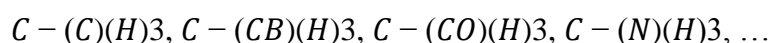
L'aspect mathématique des méthodes de contribution de groupes consiste à comprendre la contribution de chaque groupe proposé. Généralement les corrélations d'estimation des propriétés, les plus simples, sont exprimées par la sommation des contributions de chaque groupe multiplié par l'occurrence de ce dernier. Le groupe a pour but de fournir des informations sur la structure moléculaire, qui est traduit à la suite par des corrélations

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

mathématiques. La méthode la plus puissante est celle qui est capable de traduire une structure moléculaire en groupes pertinents décrivant correctement sa structure moléculaire et la majorité des effets électroniques et faire différencier entre les différentes conformations moléculaires. Les méthodes de contribution de groupes basés sur l'ordre zéro et premier ordre de découpages montre des erreurs inacceptables, et sa peut être justifié par la nature de groupe proposé. Souvent, les méthodes de contribution de groupes ne permettent pas de distinguer les différentes formes isométriques de composés similaires. Alors des scientifiques ont cherché d'autres solutions pour ce problème, par exemple ils ont introduit l'hybridation des différentes classes de découpages et qui comporte l'utilisation de deux genres de groupes, le premier et le deuxième ordre de fragmentations pour but à fournir plus d'information, et par conséquent l'amélioration du pouvoir prédictif de ces méthodes. La fragmentation d'ordre deux, un groupe est composé d'un atome central de valence strictement supérieure à 1, et d'un ensemble des liaisons qu'il forme avec ses voisins. Un groupe est noté de la manière suivante :



Où X représente l'atome central auquel sont liés i atome(s) A, j atome(s) B, k atome(s) C et un atome(s) D. On peut prendre pour exemple l'atome de carbone, C. Si ce dernier est un atome central, il peut former plusieurs groupes, tels que



En générale, les méthodes de second ordre montrent des bons résultats par rapport aux méthodes d'ordre zéro et du premier ordre, vu que ces méthodes de second ordre prennent en considération l'entourage de chaque groupe. Cette technique de second ordre permet d'augmenter la précision de la méthode grâce à la possibilité de fournir plus d'information sur les liaisons et les différentes interactions possibles.

Méthode de fragmentation d'ordre 3

La méthode la plus utilisée dans le domaine de méthodes de contributions des groupes et ayant l'un des meilleurs schémas de découpage des structures moléculaires est celle d'ordre trois développée par Marrero et Gani [3] pour estimer les propriétés physicochimiques et thermodynamiques avec une large gamme d'applications et traiter à la fois des simples molécules et des grandes molécules multifonctionnelles voire même complexes.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

La technique de fragmentation d'ordre 3 d'une structure moléculaire est considérée comme un ensemble de trois types de groupes : les groupes de premier ordre, des groupes de second ordre et de groupes de troisième ordre.

Prédiction des limites d'inflammabilité

$$FLVU = a \times \left(\frac{A}{1 + |A|} \right) + b$$
$$A = \sum_i N_i C_i + \sum_j M_j D_j + \sum_k E_k O_k$$

$$FLVL = a \times \left(\frac{A}{1 + |A|} \right) + b$$
$$A = \sum_i N_i C_i + \sum_j M_j D_j + \sum_k E_k O_k$$

Exemple : estimation des limites d'inflammabilités

Pour des constantes a et b définie dans le tableau 1 et des valeurs de contribution des groupes dans le tableau 2 nous estimons la limite inférieure et supérieure d'inflammabilité des composés suivant :

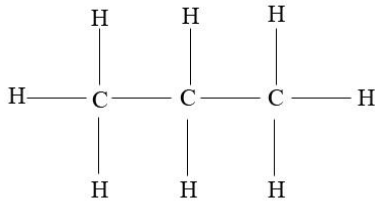
Tableau 1 : Les valeurs numériques des paramètres ajustables

	a	b
UFL	10785.543	10786.639
LFL	-9.9227	9.9255

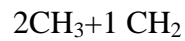
Tableau 2 : Valeurs de contribution des groupes

	UFL	LFL
CH₃	-343.613	0.819
CH₂	-205.793	1.350
CH	-41.774	2.542
C	17.358	2.758

Exemple de Propane (C₃H₈)



Fragment atomique de la molécule



Valeur de A :

$$\text{Pour la LII} = 2 \cdot 0.819 + 1.350 = 2.988$$

$$\text{Pour la LSI} = 2 \cdot (-343.613) + (-205.793) = -893.019$$

$$\text{LII} = 2.84 \%$$

$$\text{LSI} = 13.16 \%$$

D'après l'Annexe 2 Les résultats expérimentale sont :

$$\text{LII} = 2.37 \% \quad \text{et} \quad \text{LSI} = 10 \%$$

Les rapports entre les valeurs expérimental et théorique sont **0.76** pour **LSI** et **0.83** pour **LII**.

I-3 Caractéristiques des mélanges inflammables et explosifs [4] [5] [6]

I-3-1 Gaz et vapeurs

Domaine d'explosibilité

La plupart des gaz ou vapeurs inflammables en mélange avec l'air sont susceptibles d'exploser en s'enflammant dans certaines conditions.

La plage de concentrations comprises entre les limites inférieure d'explosivité (LIE) et les limites supérieures d'explosivité (LSE) est connue comme l'intervalle d'inflammabilité (Domaine d'explosivité). Le schéma ci-dessous donne une simple illustration concernant domaine d'explosibilité.

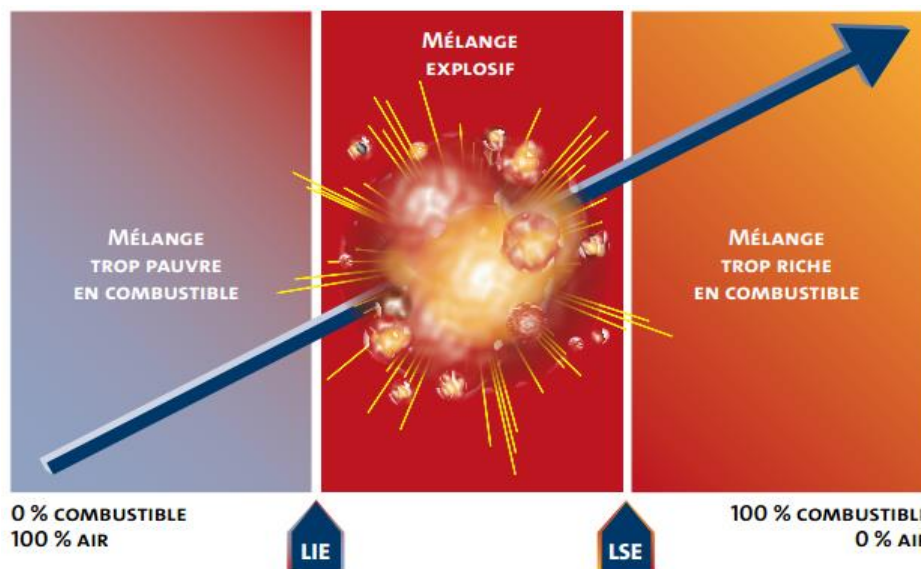


Figure 1 : Domaine d'explosivité

Au-dessous de la LIE, la concentration en gaz carburant est trop faible pour permettre la propagation de la flamme. Au-dessus de la LSE, la concentration en gaz comburant est insuffisante pour permettre la propagation de la flamme. Les concentrations limites d'inflammabilité définies ci-dessus constituent les limites du domaine d'explosivité de chaque gaz ou vapeur (figure 1)

Le tableau de l'annexe2 montre les LIE et LSE des quelques matières dans les conditions normales de pression et températures.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Atmosphère Explosive (ATEX)

Une atmosphère explosive est un mélange de substances combustibles (sous forme de gaz, vapeurs) avec l'air dans des proportions telles qu'une source d'inflammation d'énergie suffisante produise son inflammation et la propagation de la combustion au mélange non brûlé

Conditions minimales de formation d'une ATEX

ATEX formée par un gaz : la concentration du gaz dans l'air doit être comprise entre la limite inférieure et la limite supérieure d'explosivité.

ATEX formée par des vapeurs émises par un liquide : le liquide doit être à une température supérieure à son point d'éclair.

Les sources d'inflammation potentielles

Selon la norme EN 1127-1 il y a treize sources d'inflammation

- Surface chaude
- Flamme et gaz chaud
- Etincelles produites mécaniquement
- Installations électriques
- Courant transitoire, protection cathodique contre la corrosion
- Electricité statique
- Foudre
- Ondes électromagnétiques dans les gammes de fréquence
 - 9 à 300 kHz
 - 300 à 3×10^6 GHz ou de longueur d'onde de 1000 à 0,1 μm
- Rayonnement ionisant
- Ultrasons
- Compression adiabatique, onde de choc, écoulement de gaz
- Réaction chimique.

Classification des produits et mélanges combustibles inflammables [7]

Tableau 3 : Classification des liquides

Classe	Point d'éclair	Point d'ébullition
Classe I (liquides inflammables)		
Classe I A	T < 22.8°C	T < 37.8 °C

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Classe I B	$T < 22.8^{\circ}\text{C}$	$T \geq 37.8^{\circ}\text{C}$
Classe I C	$22.8^{\circ}\text{C} \leq T < 37.8^{\circ}\text{C}$	
Classe II (liquides combustibles)		
Classe II	$37.8^{\circ}\text{C} \leq T < 60^{\circ}\text{C}$	
Classe III liquides combustibles)		
Classe III A	$60^{\circ}\text{C} \leq T < 93^{\circ}\text{C}$	
Classe III B	$93^{\circ}\text{C} \leq T$	

Conditions d'inflammabilité et d'explosivité

L'inflammation (éventuellement explosive) d'une atmosphère contenant des gaz ou des vapeurs combustibles se produit lorsque ces derniers sont mélangés à de l'air, de l'oxygène ou un gaz comburant en proportion convenable et qu'un apport d'énergie suffisant ou l'élévation à une température donnée permet d'amorcer la réaction de combustion[8].

La quantité d'énergie libérée par une explosion n'est pas nécessairement supérieure à celle d'une simple combustion, mais elle est libérée dans un temps très court et donc avec une grande puissance

Facteurs influant sur l'inflammabilité

Influence de la pression sur les limites d'inflammabilité des gaz :

Les variations normales de la pression atmosphérique sont pratiquement sans effet sur les limites d'inflammabilité. L'impact de la pression initiale sur les limites d'inflammabilité est plus complexe. Son influence est très variable et dépend de la nature du mélange combustible/oxydant. Ainsi, selon le mélange.

Diminution de la pression au-dessous de la pression atmosphérique

Pour des pressions inférieures à la pression atmosphérique, tous les travaux concordent pour estimer qu'une diminution de la pression initiale conduit à une diminution du domaine d'inflammabilité [9] par élévation de la limite inférieure et abaissement de la limite supérieure (pour une certaine valeur de la pression, ces limites se rejoignent), et qu'il existe une pression en-deçà de laquelle aucune inflammation n'est plus possible. Ce point limite est difficile à préciser car il est parfois si bas qu'on ne peut plus, en laboratoire, trouver de source d'inflammation assez puissante

Augmentation de la pression

Pour des pressions supérieures à la pression atmosphérique, la LSI augmente ou diminue selon les gaz alors que la LII est peu affectée [10]. Glassman confirme ce comportement en précisant que pour les hydrocarbures simples (éthane, propane, pentane, ...), une augmentation de la pression conduit à une augmentation linéaire de la LSI, la LII étant peu ou pas affectée [11].

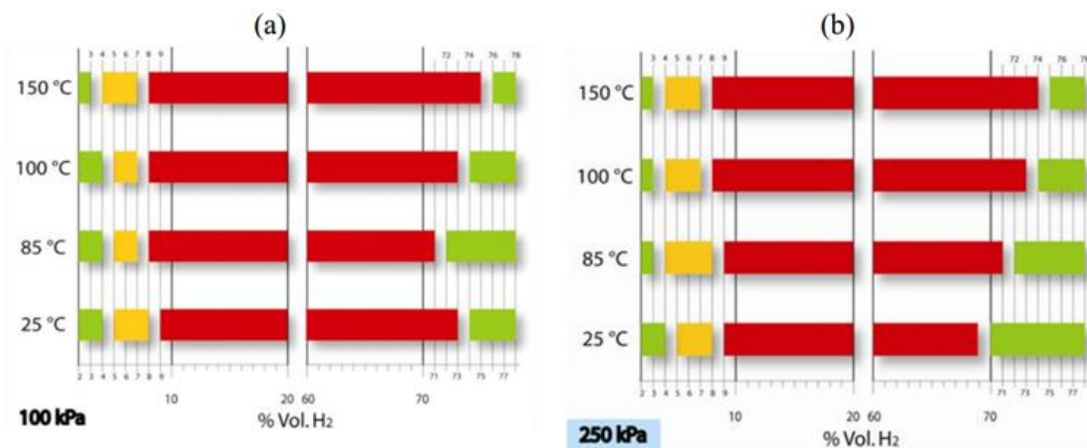


Figure 2 : Limites d'inflammabilité des mélanges hydrogène / air en fonction de la température initiale

(a) A une pression initiale de 100 kPa ; (b) A une pression initiale de 250 kPa [12]. Légende : Rouge : Domaine d'inflammabilité totale ; Orange : Domaine de propagation ascendante ; Vert : Extérieur au domaine d'inflammabilité.

Influence de la température sur les limites d'inflammabilité des gaz :

Pour la température initiale, les effets sont très simples. Une augmentation de la température conduit à un accroissement du domaine d'inflammabilité en abaissant la limite inférieure et en augmentant la limite supérieure. Dans le cas de l'hydrogène, cet effet a été confirmé par l'étude de Coward et Jones qui ont regardé l'effet de l'augmentation de la température sur les limites d'inflammabilité de mélanges hydrogène-air en propagation descendante. Quand la température augmente de 17 °C à 400 °C, la LII décroît linéairement de 9,4 à 6,3 % mol et la LSI augmente de 71,5 à 81,5 % mol (Figure 3)

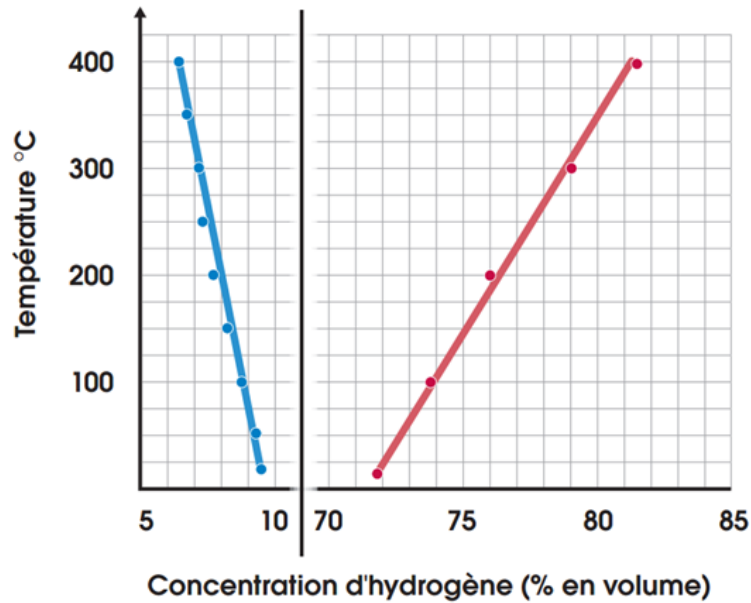


Figure 3 : Influence de la température initiale sur les limites d'inflammabilité de l'hydrogène dans l'air (propagation d'une flamme descendante) à pression atmosphérique

Cet effet est même confirmé pour des mélanges se trouvant à haute pression [12],[13]. En effet, l'étude de Cheikhavat, pour des mélanges à 100 et 250 kPa, conduit aux mêmes conclusions, à savoir qu'une augmentation de la température initiale conduit à un accroissement du domaine d'inflammabilité (à une exception près quand la température initiale augmente de 25 à 85 °C, pour une pression initiale de 100 kPa, la LSI diminue de 74 à 72 %mol) (Figure 2).

Influence de la pression et de la température sur les limites d'inflammabilité de vapeurs (en présence de liquide)

Cette influence peut se manifester dans des réservoirs ou des réacteurs clos. La pression partielle de la vapeur est celle de la vapeur saturante à la température donnée, quelle que soit la pression totale de l'atmosphère de l'enceinte. Lorsque cette pression totale augmente sans que varie la température, l'atmosphère s'appauvrit relativement en vapeur : si l'on est à la LIE, on s'en éloigne vers des valeurs de concentrations non inflammables ; si l'on est à la LSE, on s'en éloigne vers des concentrations inflammables [14].

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Influence d'une atmosphère enrichie en oxygène sur les caractéristiques d'inflammabilité [14]:

La comparaison des caractéristiques d'inflammabilité, pour des mélanges de gaz et vapeurs avec l'air et pour des mélanges avec l'oxygène, montre les variations suivantes du premier au deuxième cas :

La température d'inflammation est peu diminuée.

La LIE n'est pas changée ; il en est de même du point d'éclair.

La LSE est augmentée de façon importante.

L'énergie minimale d'inflammation est diminuée dans des rapports le plus souvent compris entre 50 et 200, ce qui laisse prévoir une inflammation quasi spontanée d'un mélange de gaz ou de vapeur combustible en proportion convenable avec de l'oxygène

Tableau 4 Caractéristiques d'inflammabilité de quelques gaz et vapeurs dans l'air et dans l'oxygène

Gaz et vapeurs	Température d'inflammation (°C)	Énergies minimales d'inflammation (μJ)	LIE %	LSE %
Acétone	-	1 150 / 2,4	2,6 / 2,6	13 / 60
Acétylène	305 / 295	17 / 0,2	2,5 / 2,5	81 / 93
Benzène	-	-	1,3 / 1,3	7,9 / 30
Butane	285 / 275	250 / 9	1,8 / 1,8	8,4 / 49
Essence 100/130	435 / 310	-	1,4 / 1,4	-
Éthane	510 / 500	250 / 2	3 / 3	12,5 / 66
Éthylène	485 / 480	70 / 1	2,7 / 2,9	36 / 80
Hexane	225 / 215	288 / 6	1,2 / 1,2	7,4 / 52
Hydrogène	545 / 540	17 / 1,2	4 / 4	75 / 95
Méthane	-	300 / 3	5 / 5	15 / 61

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Méthanol	-	-	6,7 / 6,7	36 / 93
Oxyde de carbone	600 / 580	-	12,5 / 12,5	74 / 94
Oxyde de diéthyle	180 / 170	200 / 1,3	1,9 / 2	36 / 82
Propane	480 / 470		2,2 / 2,3	10 / 45

Influence des dilutions

La présence d'un diluant en plus du mélange combustible-comburant joue énormément sur les limites d'inflammabilité. En effet, même l'azote de l'air joue ce rôle. Si on diminue la concentration d'oxygène, le domaine d'inflammabilité se rétrécit. Ceci est prouvé en mesurant les limites d'inflammabilité, par exemple de l'hydrogène, non pas dans l'air mais dans l'oxygène pur. Dans ce cas, la limite supérieure d'inflammabilité augmente de 75 à 94 %mol. Pour les cas intermédiaires d'air avec de plus en plus d'oxygène, la LSI varie linéairement entre 75 et 94 %mol. La limite inférieure d'inflammabilité, elle, reste inchangée à 4 %mol [10],[11]

Cette valeur est appelée CMO (concentration maximum en oxygène) ou MOC (maximum oxygène concentration). Elle est en général comprise entre 10 et 15 %. La MOC est légèrement différente selon la qualité du gaz inerte (azote, dioxyde de carbone, argon, etc.), utilisé pour diminuer la teneur en oxygène du mélange. On trouvera, dans le tableau 3, les valeurs des concentrations en oxygène au-dessous desquelles l'inflammation de quelques gaz et vapeurs courants ne se produit plus, ainsi que les rapports au volume d'air des volumes d'azote ou de dioxyde de carbone. Il est à noter que les valeurs pour un même gaz diffèrent selon le gaz d'inertage [14]

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Tableau 5 Concentrations maximales d'oxygène (% du volume) interdisant l'inflammation d'un mélange contenant des gaz ou des vapeurs inflammables, de l'air et de l'azote ou du dioxyde de carbone ajouté pour rendre inerte ce mélange (à températures et pressions ordinaire)

	INERTAGE PAR AZOTE		INERTAGE PAR CO2	
	% d'oxygène au-dessous duquel l'inflammation ne se produit pas	Rapport minimal du volume d'azote au volume d'air	% d'oxygène au-dessous duquel l'inflammation ne se produit pas	Rapport minimal du volume de CO2 au volume d'air
Acétone	11	0,91	13,5	0,56
Benzène	10,5	1	13	0,62
Butanes	10,7	0,96	13,2	0,59
Butènes	10,6	0,98	13,1	0,6
Carburant auto	11	0,91	13,5	0,56
Éthane	10,5	1	13	0,62
Éthanol	10	1,1	12,5	0,68
Éthylène	9,8	1,14	11,8	0,78
Heptanes	11	0,91	13,5	0,56
Hexanes	10,9	0,93	13,4	0,57
Hydrogène	4,5	3,7	7	2
Méthane	11,5	0,83	14	0,5
Méthanol	9,5	1,2	12	0,75
Oxyde de carbone	5,5	2,8	8,2	1,6

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

	INERTAGE PAR AZOTE		INERTAGE PAR CO2	
	% d'oxygène au-dessous duquel l'inflammation ne se produit pas	Rapport minimal du volume d'azote au volume d'air	% d'oxygène au-dessous duquel l'inflammation ne se produit pas	Rapport minimal du volume de CO2 au volume d'air
Oxyde de diéthyle	9,5	1,2	12	0,75
Pentanes	10,8	0,94	13,3	0,58
Propanes (cyclo inclus)	10,7	0,96	13,2	0,59
Propène	10,6	0,98	13,1	0,6

D'autres diluants ont été étudiés par Kumar dans un tube de 1,8 m de long et de 5 cm de diamètre [15]. Il a étudié l'impact de l'ajout de CO₂ et de vapeur d'eau sur les limites d'inflammabilité de propagation ascendante et descendante des mélanges H₂-O₂ et H₂-air à trois températures initiales (22, 100 et 200 °C) et pour une pression initiale variant de 20 à 51 kPa. La présence de ces diluants dans le milieu, soit H₂-O₂ soit H₂-Air, provoque une diminution du domaine d'inflammabilité.

Cheikhravat a également étudié les mélanges H₂-Air-vapeur d'eau dans une enceinte sphérique de 56 L à une température initiale de 100 °C et à une pression de 100 kPa. Lui aussi conclut à une diminution du domaine d'inflammabilité de l'hydrogène en présence de vapeur d'eau. En augmentant, la fraction de H₂O vapeur de 0 à 40 puis à 50 %vol, la LII s'accroît de 4 à 6 puis à 7 %vol alors que la LSI diminue fortement de 74 à 52 et à 20 %vol. Au-delà d'une teneur en eau supérieure à 54 %vol, aucune inflammation du mélange n'a été possible (Figure 4) [12].et même à des pressions inférieures à la pression atmosphérique (Figure 5)

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

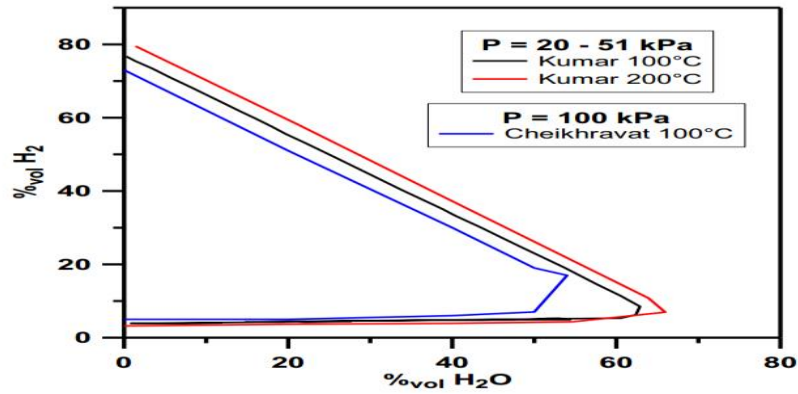


Figure 4 : Comparaison des limites d'inflammabilité des mélanges H2/air/H2O vapeur de la littérature pour différentes conditions initiales

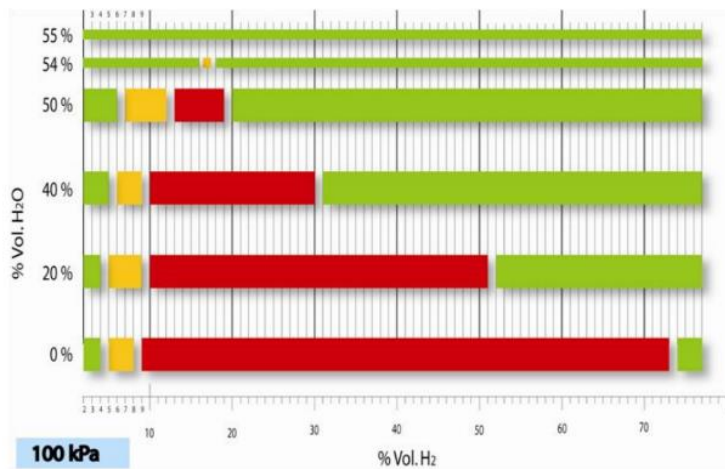


Figure 5 : Limites d'inflammabilité des mélanges H2/air/H2O initialement à 100 kPa et 100°C pour différents pourcentages de vapeur d'eau dans le mélange
Légende : Rouge : Domaine d'inflammabilité totale ; Orange : Domaine de propagation ascendante ; Vert : Extérieur au domaine d'inflammabilité.

Limites d'inflammabilité de mélanges de gaz ou vapeurs inflammables

Dans le cas d'un mélange constitué de différents combustibles, Le Châtelier a proposé l'expression de la limite inférieure d'inflammabilité du mélange en fonction des limites inférieures d'inflammabilité de chaque composant et de la composition du mélange. Cette loi s'exprime sous la forme [16] :

$$L = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{L_i}}$$

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Avec :

L : la limite d'inflammabilité (inférieure ou supérieure) du mélange ;

X_i : le pourcentage molaire de l'espèce i dans le mélange

L_i : la limite d'inflammabilité (inférieure ou supérieure) du composé i pur.

Cependant, bien que cette relation donne de bons résultats lorsque le mélange est composé de combustibles de natures voisines (par exemple un mélange d'hydrocarbures ou un mélange hydrogène, monoxyde de carbone, méthane), de grands écarts peuvent être observés avec l'expérience lorsque les composés sont de nature chimique différente les uns des autres.

Par exemple, la limite inférieure d'inflammabilité d'un gaz naturel dont la composition est la suivante :

Méthane : 80 % LIE : 5,3 %

Éthane : 15 % LIE : 3,22 %

Propane : 4 % LIE : 2,37 %

Butane: 1 % LIE: 1,86 %

$$L = \frac{100}{\frac{80}{5.3} + \frac{15}{3.22} + \frac{4}{2.37} + \frac{1}{1.86}} = 4,55 \%$$

Energies minimales d'inflammation

Lorsque le mélange combustible se trouve à l'intérieur des limites d'inflammabilité, une énergie extérieure doit lui être apportée afin d'initier la combustion. Une valeur référence peut être alors définie : l'énergie minimale d'inflammation (ou EMI) qui correspond au minimum d'énergie qu'il faut apporter au milieu pour qu'une inflammation se produise. Cette énergie minimale d'inflammation dépend de la nature du combustible, de la composition du mélange gazeux et des conditions de pression et de température initiales. D'autres paramètres rentrent également en compte comme le temps de libération de l'énergie et la taille du volume dans laquelle elle est libérée [10].

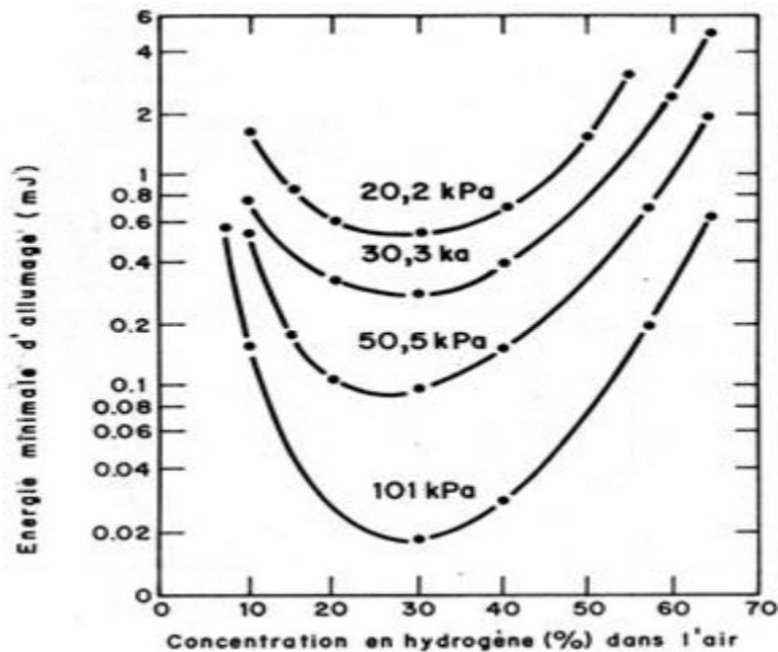


Figure 6 Energie minimale d'inflammation de mélanges hydrogène-air en fonction de la teneur en hydrogène dans le milieu pour différentes pressions initiales et à température ambiante

L'effet de la stœchiométrie sur l'énergie minimale d'inflammation

Pour les mélanges qui s'éloignent de la stœchiométrie (qu'ils deviennent riches ou pauvres), la valeur de l'énergie minimale d'inflammation augmente. Par exemple, pour un mélange avec 10 %mol d'hydrogène, l'énergie minimale d'inflammation augmente de 0,02 mJ à 0,6 mJ (Figure 6).

L'effet de la pression sur l'énergie minimale d'inflammation :

La pression joue également un effet sur l'EMI du mélange. En effet, lorsque la pression décroît, l'énergie minimale d'inflammation s'accroît. Par exemple, lorsque la pression décroît de 101 à 20,2 kPa, l'énergie minimale d'inflammation du mélange à la stœchiométrie s'accroît de 0,02 à 0,6 mJ (Figure 6) [17] [18]

I-3-2 Poussières combustibles

Définition

On désigne par poussière les petites particules solides qui se déposent sous l'effet de leur poids mais qui peuvent rester en suspension dans l'air pendant un certain temps.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Les poussières peuvent soit être fabriquées dans un but déterminé (farines...), soit être générées au cours du traitement ou de la transformation de matériaux solides (sciure de bois...), soit résulter de l'abrasion de matières solides lors du transport (céréales...).

Poussière combustible : Une poussière est combustible si elle est susceptible de subir une réaction exothermique avec l'air lorsqu'elle est enflammée

Toutes les poussières combustibles sont capables de provoquer une explosion dès que le diamètre des particules est inférieur à 500 μm . Il s'agit d'un phénomène très général, connu depuis longtemps. On peut citer notamment les poussières :

- ✓ Alimentaires (amidon, sucre, farine...),
- ✓ Végétales (écorces, liège, coton, bois...),
- ✓ Métalliques (aluminium, magnésium, ferroalliages...),
- ✓ Industrielles (matières plastiques, déchets pulvérisés...).

Généralités sur les explosions de poussières

Mécanisme des explosions des poussières

Pour que des poussières puissent exploser, il faut qu'elles soient combustibles, qu'elles forment, avec l'air, un nuage, mélange relativement homogène, de concentration convenable et satisfaisante à certaines conditions.

Des sources d'inflammation efficaces induisent, sur les particules d'un tel nuage, des réactions dont le bilan global est exothermique qui, présentées de manière simplifiée, peuvent être :

- Une oxydation de surface, prépondérante pour les poussières métalliques,
- Une pyrolyse, accompagnée d'émission de gaz combustibles formant autour de chaque particule un mélange gazeux explosif qui s'enflamme

Une explosion (transformation brutale d'un système matériel avec émission de gaz chauds) sera possible si, en premier lieu, sont réunies simultanément les trois conditions de la combustion :

- ✓ Présence d'un comburant ;
- ✓ Présence d'un produit pulvérulent combustible à l'état suffisamment divisé (au moins une partie des particules dont le diamètre est inférieur à 0,5 mm) ;
- ✓ Présence d'une source d'inflammation pour amorcer l'explosion ;

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

La réunion des trois conditions indique que l'explosion n'est qu'un cas particulier de la combustion ; il s'agit d'une combustion qui se déroule très rapidement. Pour que cette combustion puisse être qualifiée d'explosion, trois conditions complémentaires sont nécessaires :

- ✓ Présence de poussières en suspension ;
- ✓ Obtention d'un domaine d'explosivité ;
- ✓ Confinement suffisant ;

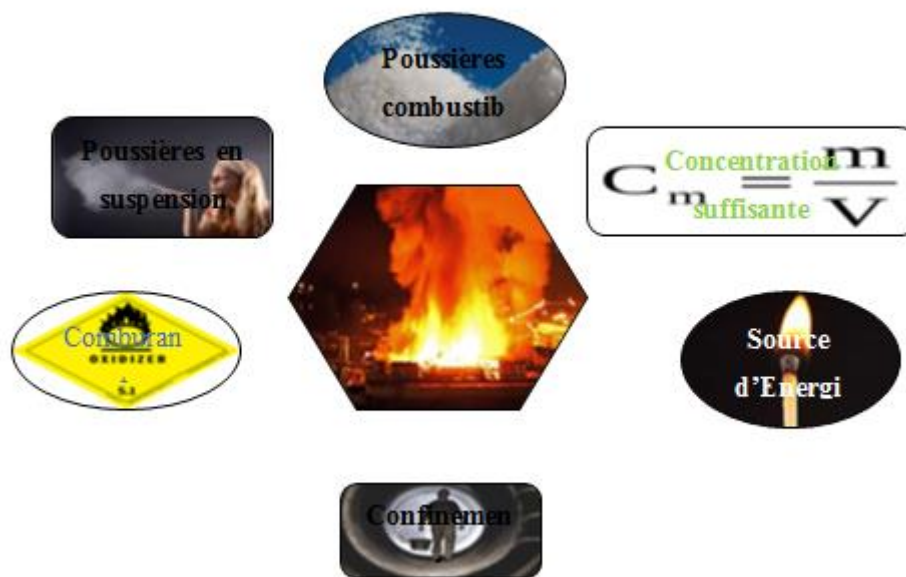


Figure 7 Hexagone d'explosion des poussières

Caractéristiques des atmosphères poussiéreuses :

Valeurs d'inflammation :

Les poussières de toutes les matières combustibles sont susceptibles de s'enflammer et d'exploser plus ou moins violemment. La facilité d'inflammation d'une poussière est mesurée par les valeurs minimales de quelques caractéristiques : concentrations inflammables, température et énergie d'inflammation, etc.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Formation des nuages de poussières :

Les nuages de poussières peuvent être créés :

- Par mise en suspension, lente ou rapide, dans l'air, de poussières disposées en couches (courant d'air, remous lors de l'inflammation de couches, souffle d'une déflagration initiale)
- Lors des traitements de matières (ponçage, broyage...), de leur transport (pneumatique en particulier), de manutentions (vidanges ou remplissages de silos et de dépoussiéreurs, pelletage, vibrations de tamis...).

La stabilité des nuages dépend de la densité des poussières, de leur cohésion, de leur forme, de leur humidité, de leurs dimensions.

Granulométrie :

Les nuages se forment d'autant plus facilement et sont d'autant plus stables que les poussières qui les constituent sont plus fines. Les poussières fines restent le plus longtemps en suspension : elles sont donc les plus dangereuses.

Le tableau ci-dessous indique les vitesses de sédimentation en fonction de la taille des particules lorsqu'il n'y a pas de turbulence.

Tableau 6 Vitesse de sédimentation

Diamètre des particules en microns	Vitesse de sédimentation en m.s ⁻¹
200	1,2
100	0,3
50	0,03
10	0,003 (soit 11 m.h ⁻¹)
5	0,0007 (soit 2,52 m.h ⁻¹)
1	0,00003 (soit 0,1 m.h ⁻¹)

Les poussières sont plus explosibles lorsqu'elles sont plus fines.

La probabilité d'une explosion devient faible pour des poussières dont les dimensions sont supérieures à 500 µm. Un exemple des caractéristiques d'explosibilité de poussières d'aluminium en fonction des diamètres moyens est montré par figure 8.

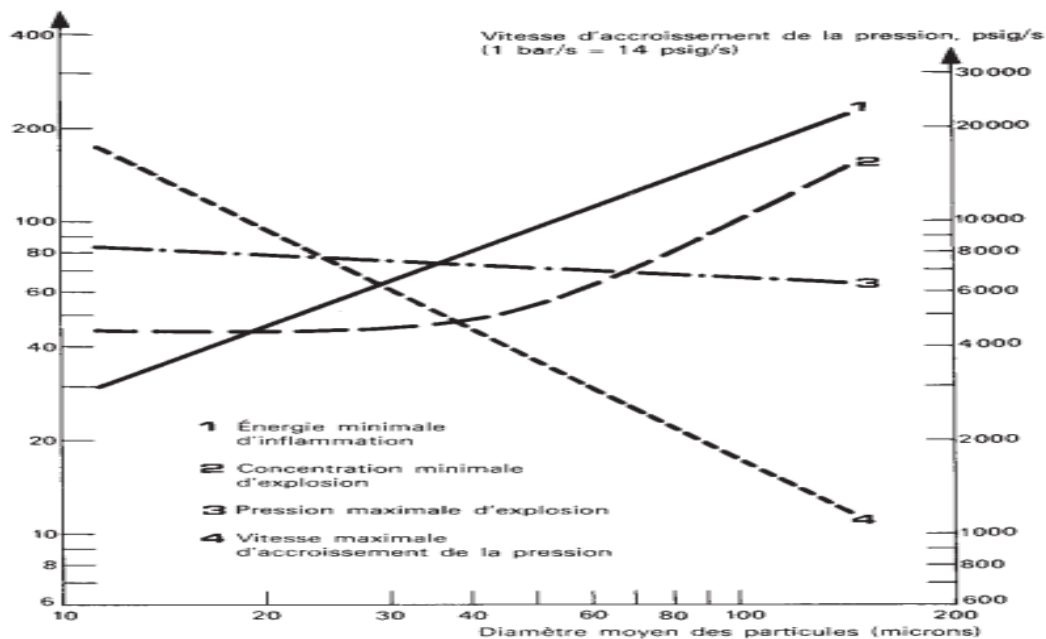


Figure 8 Influence du diamètre moyen des particules d'aluminium pulvérisé sur les caractéristiques d'explosivité et d'explosion (d'après l'US Bureau of Mines).

Concentrations minimales d'explosion

On définit pour chaque type de poussière combustible, une concentration minimale d'explosion (limite inférieure d'explosivité ou LIE) dans l'air au-dessous de laquelle l'explosion ne se produit pas. La concentration minimale d'explosion dépend sensiblement de la granulométrie (figure 8), de l'énergie de la source d'inflammation, du volume et de la forme des enceintes. Les concentrations minimales explosives des poussières ne sont pas connues avec autant de précision que celles des gaz.

Les concentrations maximales d'explosion (limite supérieure d'explosivité ou LSE) des poussières sont moins bien définies que celles des gaz et sont rarement mesurées. Elles sont de l'ordre de 1 à 3 kg.m⁻³

Initiation des explosions de poussières :

✚ Températures minimales d'inflammation :

Les nuages de poussières peuvent exploser spontanément lorsque leur température minimale d'inflammation qui est généralement comprise entre 300 et 700 °C est atteinte.

La température minimale d'inflammation des poussières en couches est, en général, bien inférieure à la précédente et située entre 150 et 350 °C

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

✚ Énergie d'inflammation :

Les nuages de poussières peuvent être enflammés aux températures ordinaires par une flamme ou une étincelle d'énergie suffisante. Celle-ci, selon les poussières, peut varier de 5 millijoules à 1 joule. Pour une même poussière, l'énergie minimale d'inflammation varie avec la granulométrie (figure 8).

Composition de l'atmosphère :

Un appauvrissement suffisant de l'air en oxygène empêche l'inflammation des poussières, bien que certaines d'entre elles (magnésium, zirconium, titane, uranium...) puissent s'enflammer dans des atmosphères où la proportion d'oxygène est très faible. On peut ainsi prévenir l'explosion de poussières dans des enceintes closes en diminuant au-dessous d'une certaine valeur, par dilution au moyen d'un gaz inerte

Caractéristiques d'explosion des poussières

a) La violence des explosions de poussières :

La violence des explosions de poussières est caractérisée par la surpression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression :

- ✓ Surpression maximale d'explosion (Pmax) : les surpressions maximales d'explosion, selon la nature des poussières et les facteurs indiqués plus loin, varient de 3 à 10 bars environ, exceptionnellement de 30 bars dans un régime de détonation
- ✓ Vitesse maximale de montée en pression : la vitesse d'accroissement de la pression atteint, au cours de l'explosion, une valeur maximale dp/dt_{max} . Celle-ci peut varier, selon les poussières, de 1 bar/s à plus de 1 000 bars/s.

D'une manière générale, les explosions de poussières prennent le régime de déflagration. Exceptionnellement, certaines poussières, comme celles de l'aluminium, peuvent, dans des enceintes de forme favorable (canalisations, par exemple) approcher ou atteindre un régime de détonation.

Tableau 7 Catégories de poussières

	Classe	K_{max} en bar.m.s ⁻¹
St	0	0
St	1	$1 < K_{max} \leq 200$
St	2	$200 < K_{max} \leq 300$
St	3	$300 < K_{max}$

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Les facteurs influencent l'explosion des poussières :

Granulométrie :

La vitesse maximale d'accroissement de la pression est d'autant plus élevée que les poussières sont plus fines.

Concentration des poussières dans l'atmosphère :

La surpression et la vitesse de montée en pression ont en général une valeur maximale pour une valeur donnée de la concentration. Celle-ci pour un grand nombre de poussières est comprise entre 200 et 500 g.m⁻³

Taux d'humidité :

La rétention d'eau abaisse les caractéristiques d'explosivité d'une poussière. La présence d'humidité sous forme de vapeur d'eau diminue l'explosivité de plusieurs manières : elle favorise la cohésion des poussières et leur agglomération, diminue la formation des charges d'électricité statique et absorbe de la chaleur.

Mélanges hybrides :

Les mélanges hybrides, composés à la fois de vapeur (ou gaz) et de poussières avec l'air, nécessitent des mesures de prévention particulières intermédiaires entre celles prises pour les gaz et vapeurs et celles prises pour les poussières. La rétention de solvant augmente fortement les caractéristiques de l'explosion.

Initiation de l'explosion :

La violence d'une explosion de poussières croît généralement avec l'énergie de la source d'inflammation.

Turbulence :

La turbulence initiale d'une atmosphère inflammable accroît légèrement la pression et très fortement la vitesse de montée en pression et, par conséquent, la violence. Il n'existe pas de méthode de mesure de la turbulence existant dans les installations industrielles. Il est donc recommandé de s'adresser à des organismes spécialisés pour l'évaluer.

I-4 Les zones classées et leurs exigences

Déférents types des zones

La réglementation oblige la définition des zones classées selon la possibilité de présence de gaz ou de vapeurs combustibles dans l'atmosphère. L'exploitant, sous la responsabilité du chef d'établissement détermine les zones selon les définitions suivantes :

Tableau 8 :Les Zones ATEX [19]

Probabilité de présence d'une ATEX	Haut	Moyenne	Faible	Improbable
Durée de présence	>De 1000 heures par an	10> nbr d'heures par an< 1000	1> nbr d'heures par an <10	<1 heure
Définition	Emplacement où une atmosphère explosive est présente en permanence pendant longues périodes ou fréquemment	Emplacement où une atmosphère explosive est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal	Emplacement où une atmosphère explosive n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal ou si elle se présente néanmoins, n'est que de courte durée (fonctionnement anormal prévisible)	Emplacement non dangereux
Zone	Zone 0	Zone 1	Zone 2	Hors zone 'zone non classée'

Panneau de signalisation

L'ensemble des zones 0,1, 2 constitue la zone dangereuse liée à un équipement ou à un ensemble d'équipements. Les zones dangereuses sont repérées par un panneau de signalisation



I-5 Cadre réglementaire sur les composés chimiques dangereux (inflammables)

Règlementation algérienne

REGLEMENTATION ALGERIENNE CONCERNANT LES SUBSTANCES : JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N°04 28 Dhou El Kaada 1425, 9 janvier 2005

Article.1	En application des dispositions de l'article 10 de la loi n°88-07 du 26 janvier 1988, susvisée, le présent décret a pour objet de définir les prescriptions particulières de sécurité applicables aux substances, produits ou préparations dangereuses fabriqués localement ou importés afin d'assurer aux travailleurs des conditions de prévention contre les risques professionnels en milieu de travail.
Article .4	— La définition des catégories relatives aux substances, préparations ou produits dangereux est déterminée par arrêté du ministre chargé du travail et du ou des ministres concernés.
Article.5	— Les emballages des substances, produits ou préparations dangereuses doivent être solides, étanches et appropriés.
Article .6	— Sans préjudice des dispositions législatives et réglementaires en vigueur, toutes les substances, produits ou préparations dangereuses doivent être étiquetés et marqués de manière à permettre leur identification et fournir les informations essentielles au sujet : — de leur nom chimique ; — de leur désignation ou de leur nom commercial ; — de leur classification ; — de leur symbole d'identification ; — des dangers qu'ils présentent ; — des conseils de prudence en matière de sécurité.
Article. 7	—Les caractéristiques du marquage et de l'étiquetage, ainsi que les conditions auxquelles doivent satisfaire les récipients, sacs ou enveloppes contenant lesdites substances, produits ou préparations dangereuses seront définis par arrêté du ministre chargé du travail et du ou des ministres concernés
Article .8	—Le stockage doit être entouré de précautions particulières destinées à préserver les travailleurs, les biens et l'environnement, des risques qui s'y rattachent selon les règles et les normes en la matière, conformément à la réglementation en vigueur.
Article.10	Une fiche de données de sécurité comportant les informations essentielles détaillées sur l'identification des substances, produits ou préparations dangereuses, leur fournisseur,

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

	leur classification, les dangers qu'ils présentent, les précautions de sécurité et les procédures d'urgence à prendre doit être fournie aux institutions et à l'organisme national compétent en matière d'hygiène et de sécurité, par les organismes employeurs à charge pour ces employeurs de l'établir par leurs soins ou de l'exiger de leurs fournisseurs.
Article.11	—Les quantités de substances, produits ou préparations dangereuses, utilisées pour les besoins de production sur les lieux de travail seront limitées aux quantités quotidiennement nécessaires.

Décret exécutif n° 07-144 du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

Art. 1	— En application des dispositions de l'article 23 de la loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003, susvisée, le présent décret a pour objet de fixer la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.
Art. 2	— La nomenclature des installations classes pour la protection de l'environnement est une classification qui comporte : A - L'attribution d'un numéro de rubrique à quatre chiffres, structuré comme suit : - Le premier chiffre représente la substance utilisée ou l'activité ; - Le second chiffre représente la catégorie de danger (très toxique, toxique, inflammable, comburante, explosible, corrosive et combustible) ou la branche d'activité. Les deux derniers chiffres représentent le type d'activité. B - La désignation de l'activité de l'installation classée ; C - L'identification du régime d'autorisation ou de déclaration, conformément aux dispositions du décret exécutif n° 06-198 du 4 Joumada El Oula 1427 correspondant au 31 mai 2006, susvisé ; D - La détermination du rayon d'affichage de l'installation classée ; E - Les documents à joindre à la demande d'autorisation d'exploitation des établissements classés à savoir, selon le cas, l'étude d'impact sur

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

	l'environnement, l'étude de danger, la notice d'impact sur l'environnement et le rapport sur les produits dangereux.
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Arrêté interministériel du 13 Safar 1437 correspondant au 25 novembre 2015 fixant la liste et la classification des matières et produits chimiques dangereux.

Art. 1	En application des dispositions de l'article 2 du décret exécutif n° 03-451 du 7 Chaoual 1424 correspondant au 1er décembre 2003, modifié et complété, susvisé et sur proposition du comité technique des matières et produits chimiques dangereux, le présent arrêté a pour objet de fixer la liste et la classification des matières et produits chimiques dangereux.
Art. 2	La liste citée à l'article 1er, est annexée à l'original du présent arrêté, elle indique pour chaque matière ou produit chimique dangereux son numéro d'identification selon la classification de l'Organisation des Nations-Unies et sa classe de risque principal telle que définie à l'article 3.

Décret exécutif n° 03-452 du 7 Chaoual 1424 correspondant au 1er décembre 2003 fixant les conditions particulières relatives au transport routier de matières dangereuses

Art.1	— En application des dispositions de l'article 38 de la loi n° 01-13 du 17 Joumada El Oula 1422 correspondant au 7 août 2001, susvisée, le présent décret, a pour objet de définir les conditions particulières relatives au transport routier de matières dangereuses.
Art. 2	— Il est entendu, au sens du présent décret, par la définition des termes suivant : Matières dangereuses, Transport de matières dangereuses, Emballage, Colis
Art. 3	— Les dispositions du présent décret s'appliquent au transport de matières dangereuses telles que définies ci-dessus. Elles s'appliquent également aux opérations annexes ou connexes au transport des matières dangereuses, telles que la conception des emballages, leur entretien, la préparation des colis, leur acheminement et leur entreposage sur le véhicule automobile
Art. 4	— Les matières dangereuses, visées à l'article 2, sont rangées en neuf (9) classes

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

	énumérées, réparties en fonction de leurs caractéristiques propres ainsi que de la nature des dangers qu'elles présentent
Art. 5	— Le transport de matières dangereuses est soumis à une autorisation préalable du ministre chargé des transports. Les conditions et modalités de délivrance de l'autorisation, sont définies par arrêté conjoint des ministres chargés des transports, de la défense nationale, de l'intérieur et des collectivités locales et de l'environnement.
Art. 6	— Chaque matière dangereuse transportée doit être contenue dans un emballage approprié, selon la classe dans laquelle elle est rangée.
Art. 9	— Tout colis renfermant une matière dangereuse doit comporter d'une façon apparente des étiquettes indélébiles et bien lisibles destinées à identifier, de l'extérieur la nature de la matière dangereuse et le/ou les dangers qu'elle présente afin d'attirer l'attention des différents intervenants, en cours de manutention et de transport, sur les dispositions et précautions à prendre.
Art. 21	— Le transport routier de matières dangereuses obéit aux dispositions de la loi n° 01-14 du 29 Joumada El Oula 1422 correspondant au 19 août 2001, susvisée, et aux règles particulières de circulation de chaque classe de matières dangereuses concernant : — la capacité des conducteurs et des convoyeurs, — la vitesse de circulation, — la composition des convois, — l'escorte, — l'itinéraire, l'origine, le lieu de chargement, la destination et le lieu de déchargement des produits, — le stationnement, la surveillance, — les horaires d'évolution, — Les équipements sensibles.

Législation européenne concernant l'ATEX

DIRECTIVE ATEX « CONSTRUCTEUR » (94/9/CE)

Cette directive, « appareils et systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible » [82], adoptée le 23 mars 1994, concerne le rapprochement des législations des Etats membres de la Communauté Européenne.

Comme la précédente, il s'agit d'une directive « nouvelle approche » destinée à favoriser le libre échange des marchandises au sein de la Communauté, ce qui lui confère parfois l'appellation de directive ATEX 100A (fondée sur l'ancien article 100A du Traité de Rome).

Elle prévoit l'harmonisation des exigences essentielles de santé et de sécurité, figurant à l'annexe II de cette directive, ainsi que des procédures de vérification de la conformité, et introduit le marquage « CE » pour les appareils et systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible.

La directive 94/9/CE prévoit la classification des appareils en deux groupes :

Groupe I : comprend les appareils destinés aux travaux souterrains des mines,

Groupe II : comprend les appareils destinés à être utilisés dans d'autres lieux susceptibles d'être mis en danger par des atmosphères explosibles.

Au sein de chaque groupe, plusieurs catégories de matériels sont définies, en fonction de leur utilisation :

Catégorie 1 : appareils conçus pour assurer un très haut niveau de protection,

Catégorie 2 : appareils conçus pour assurer un haut niveau de protection,

Catégorie 3 : appareils conçus pour assurer un niveau normal de protection (cette catégorie ne concerne que le groupe II).

La directive 94/9/CE impose des exigences essentielles de sécurité et de santé pour les appareils non électriques destinés à être utilisés en atmosphère explosible, ainsi que pour les appareils destinés à être utilisés dans des environnements explosibles en raison de la présence de poussières.

Elle s'applique également aux systèmes de protection et aux dispositifs destinés à être utilisés en dehors d'atmosphères explosibles mais qui sont nécessaires ou qui contribuent au fonctionnement sûr des appareils et systèmes de protection au regard des risques d'explosion.

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

Application parallèle des directives « ATEX constructeur » et « machine »

La directive 94/9/CE est une directive spécifique au sens de l'article 1er, paragraphe 4, de la directive « machine ». Elle contient des exigences très spécifiques et détaillées visant à éviter les dangers dus à des atmosphères explosibles, tandis que la directive sur les machines ne contient que des exigences très générales en ce qui concerne les explosions.

En ce qui concerne la protection contre l'explosion dans une atmosphère explosible, c'est la directive 94/9/CE qui doit être appliquée. En revanche, les exigences de la directive « machine » doivent être appliquées quant aux autres risques présentés par les machines.

DIRECTIVE ATEX « UTILISATEUR » (1999/92/CE)

La directive ATEX 1999/92/CE [87], adoptée le 16 décembre 1999, concerne les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives.

Cette directive « sociale », encore appelée ATEX 118A, est la 15ème directive particulière de la directive cadre 89/391/CEE décrite ci-dessus. 92 / 160

Elle impose à l'employeur d'évaluer les risques d'explosion en tenant compte de la probabilité d'occurrence d'atmosphères explosibles, de la probabilité d'apparition des sources d'inflammation, des substances utilisées, des procédés et de leurs interactions éventuelles dès l'installation des équipements et enfin de l'étendue des conséquences prévisibles. Les risques d'explosion doivent être appréciés globalement.

DIRECTIVE ATEX (2014/34/UE) :

Concerne les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible.

Le terme appareils englobe les machines, les matériels, les dispositifs fixes ou mobiles, les organes de commande, l'instrumentation et les systèmes de détection et de prévention qui, seuls ou combinés, sont destinés à la production, au transport, au stockage, à la mesure, à la régulation, à la conversion d'énergie ou à la transformation de matériau et qui, par les sources potentielles d'inflammation qui leur sont propres, risquent de provoquer le déclenchement d'une explosion.

Les systèmes de protection sont les dispositifs, autres que les composants des appareils, dont la fonction est d'arrêter immédiatement les explosions naissantes ou de limiter la zone

Chapitre 01 : Généralité sur les propriétés d'inflammabilité

affectée par une explosion et qui sont mis à disposition séparément sur le marché comme systèmes à fonction autonome.

La directive prévoit notamment des obligations pour les fabricants et donne les exigences essentielles auxquelles doivent satisfaire les appareils et les systèmes de protection ainsi que les procédures d'évaluation de conformité.

Chapitre 02 : Présentation du groupe NAFTAL

II-1 Introduction

NAFTAL est une entreprise algérienne, filiale de SONATRACH, ayant pour missions la commercialisation et la distribution des produits pétroliers.

NAFTAL est spécialisée dans la conception, l'élaboration et la distribution de lubrifiants pour moteurs (deux – roues, automobiles et autres véhicules) ainsi que pour l'industrie.

II-2 Missions principales de l'entreprise NAFTAL

Les missions principales du groupe NAFTAL sont les suivantes :

- Distributions, stockages et la commercialisation des carburants (terre, aviation et marine), lubrifiants, GPL et bitumes.
- Intervient dans les domaines de l'enfûtage des GPL, de la formulation du bitume.
- Transport des produits pétroliers.
- Commercialisation d'une gamme complète de lubrifiants automobile et industriel.

II-2-1 Branche Carburant de NAFTAL

La Branche Carburant est l'une des trois Branches de NAFTAL. Elle est chargée des activités d'approvisionnement, de stockage et de livraison des carburants : Aviation, Marine et Terre (Gasoil, Essences Super, normal et sans plomb, Gasoil, A72, white spirit) ainsi que les lubrifiants et graisses. Elle est constituée de Dix (10) District, et chaque district comprend plusieurs Dépôts.

II-2-2 Missions principales du District Carburants

- ✓ Superviser, coordonner et contrôler les activités d'approvisionnement, stockage, ravitaillement et de livraison des carburants terre au niveau des dépôts primaires et secondaires.
- ✓ Assurer la préservation de la conformité du produit de son approvisionnement jusqu'à sa livraison ou son ravitaillement, conformément aux exigences de son client (Branche Commercialisation).
- ✓ Assurer la maintenance des installations de stockage et des moyens de distribution.
- ✓ Assurer une qualité de service répondant aux attentes de la branche commercialisation et veiller au maintien de l'image de marque de l'Entreprise.

II-2-3 Infrastructures de la Branche Carburants

- Activités Aviation : 28 Centres et dépôts Aviation opérationnels ;
- Activités Marine : 06 Centres Marine opérationnels ;
- Activités CBRT : 24 Dépôts carburants terre ;

II-2-4 Le District Carburant Oran comprend deux (2) dépôts Carburants Terre

- Dépôt Carburants de Petit Lac ;
- Dépôt Carburants de Remchi.

II-3 Présentation de dépôt CDS 317 « PETIT- LAC »

Le dépôt CDS 1317 carburant de Petit lac Oran regroupe 03 dépôts : ex ESSO, BERRYL et B.P. Mis en exploitation en 1947, il a été acquis par SONATRACH Division Commerciale dans le cadre de la Nationalisation des hydrocarbures en 1971.

- Une première rénovation du centre de stockage a été effectuée en 1980 par GTP, la restructuration en 1982 et SONATRACH Commerciale est devenue NAFTAL SPA.
- Une seconde rénovation et mise en conformité des installations d'exploitation et de sécurité incendie et environnement ont été réalisées en 2003/2005 par BATENCO.

Le centre compte actuellement un effectif global de 127 agents.

II-3-1 Situation géographique

Le centre CDS 317 est implanté en plein agglomération au Sud /Est de la ville d'Oran, au sein d'une ancienne zone industrielle. Il est implanté au lieu-dit Petit Lac, dans le quartier Ibn-Sina, wilaya d'Oran.

Le centre est situé (ex Petit Lac) daïra d'Oran ; il occupe une superficie globale de 12 hectares 350 délimitée comme suit :

Au Nord : établissement scolaire et rue de Ouargla

Au Sud : route + locaux SNTF

A l'Est : habitations riveraines + chemin rural N° 07.

A l'Ouest : route + SNTF.

- Le centre se situe dans un tissu urbain.

- Les fréquences et les directions des vents enregistrées montrent que les vents prédominants sont des vents Nord – sud
- Le centre se situe dans une zone urbaine délimité par deux établissements scolaires et un établissement de santé urbaine.
- Par le nord existe des habitations limitrophes au périmètre de sécurité.



Figure 9 : Localisation géographique de NAFTAL

II-3-2 Les installations du Centre CDS 317 PETIT LAC

- Bâtiment Administratif : 220 m².
- Zones de stockages carburants.
- Atelier technique : 480 m².
- Local incendie : 120 m².
- Infirmerie (centre de santé) 100m².
- Vestiaires : 176 m².
- Bâtiment exploitation et sécurité industrielle : 65m².
- Logements d'astreintes : 02.
- Embranchement ferroviaire : 03 voies.
- Pomperie de chargement.

II-3-3 Organigramme du Centre Carburant Petit-lac



Figure 10 : Organigramme de l'entreprise

II-3-4 Service Exploitation

Le Centre Carburant Petit-lac 317 a pour principal rôle de stocker et de distribuer les carburants terres (essence super, sans plomb et gasoil, kérosène), ces derniers sont acheminés au centre par pipeline et proviennent essentiellement de la raffinerie d'Arzew ainsi que le centre fonctionne selon le processus comme expliquer dans le schéma suivant :

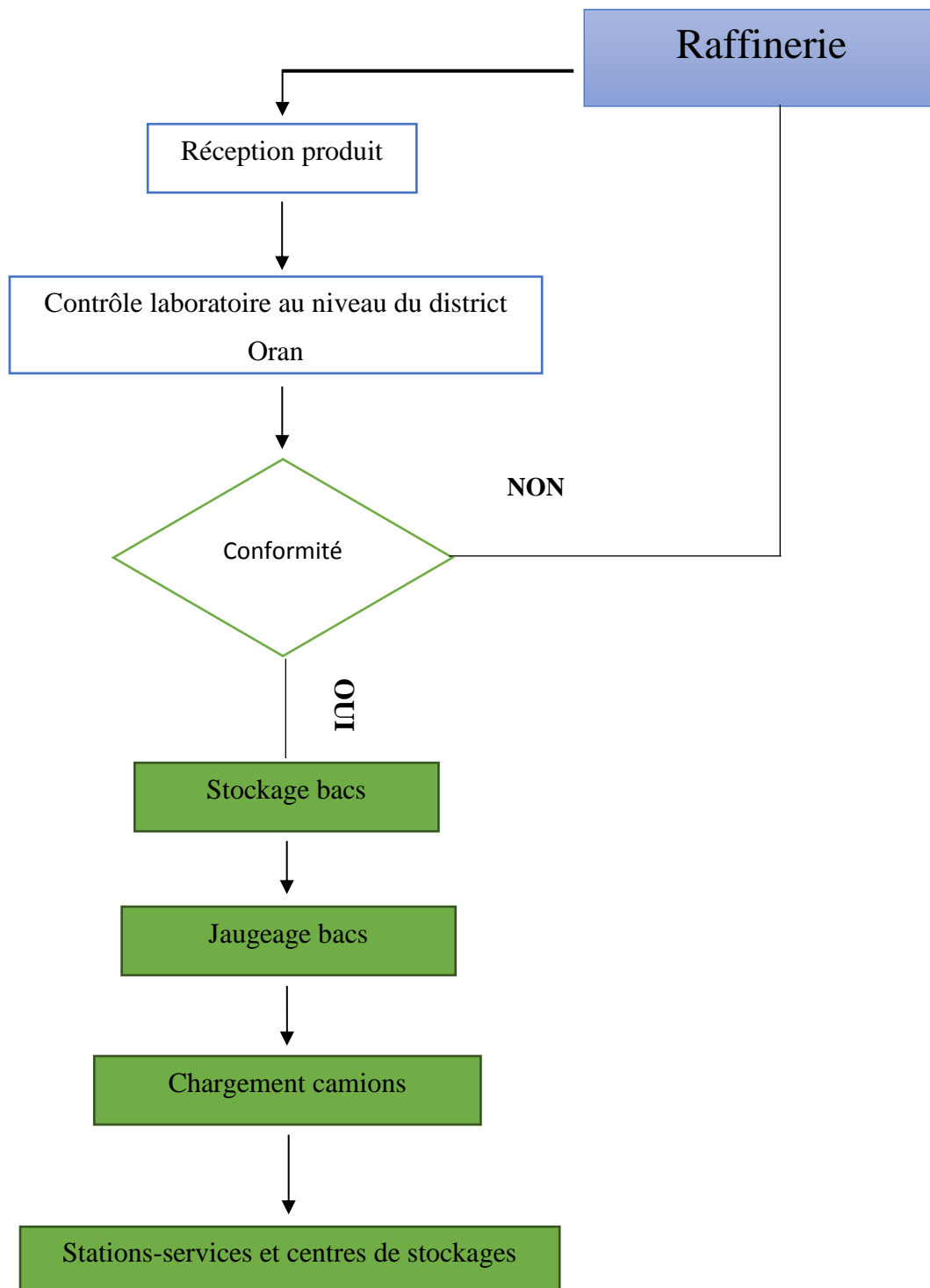


Figure 11 Schéma synoptique de fonctionnement du centre CDS Oran petit lac.

TDA- petit lac

Deux pompes d'expédition en parallèle alimentent à travers une conduite de 08'', le centre de Petit lac.



Figure 12 : Terminal départ Arzew

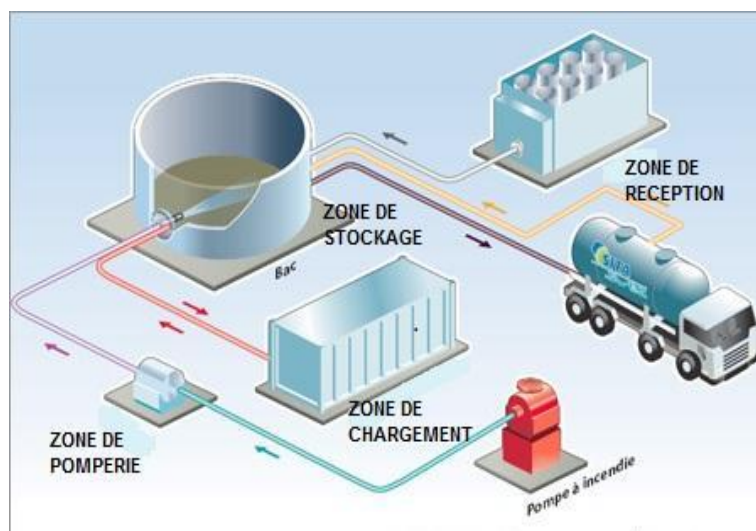


Figure 13 : Schéma des quatre (4) zones constituant le Centre Petit lac 317

Le processus de distribution des produits carburants terre comporte quatre grandes étapes qui se distinguent en fonction de la nature des tâches qui y sont effectuées : Zone de réception ; Zone de stockage ; Zone de pomperie et les Postes de chargement. Chacune de ces zones est classée à risque élevé car elles mettent en jeu des matières hydrocarbures à fort potentiel d'inflammabilité et d'explosivité.

II-3-5 Zone de réception

Comme son nom l'indique, cette zone est le siège de la réception des différents produits provenant par pipeline (Raffinerie). La zone de réception est constituée de deux lignes qui se différencient par la nature du produit qui y circule. La réception des différents produits Essences, super et Gasoil, se fait par pipe en provenance de la raffinerie d'Arzew et par cabotage de la raffinerie d'Arzew et de l'étranger. L'approvisionnement est programmé au préalable après une réunion hebdomadaire entre NAFTEC et NAFTAL. Chaque expédition programmée, fait l'objet d'un ordre d'expédition, à cet effet la raffinerie et le Centre 317 prennent toutes les dispositions pour le bon déroulement de toute l'opération.

L'opération de réception des produits nécessite les actions préalables suivantes :

- ✓ La désignation de la source d'approvisionnement (raffinerie) ;
- ✓ Préparation au niveau du centre pour la réception du produit ;
- ✓ Vérification de la nature (quantité et qualité) du produit ;
- ✓ Disposer les installations (Lignes et bacs) ;
- ✓ Ordonner le début du transfert ;
- ✓ Surveillance et suivi du transfert (lignes, niveaux bacs, - débits et pression de pompage) ;
- ✓ Fin de pompage.
- ✓ Fermeture des vannes (pieds de bacs et vannes de réception)
- ✓ Finalisation administrative du transfert.

II-3-6 Zone de stockage

Cette entité occupe une superficie de plus de 6 ha, divisée en deux (02) aires (zones) de stockage comportant 29 bacs d'une capacité globale nominale de 51 040 m³.

Chapitre 02 : Présentation du groupe NAFTAL

La Zone 1 est à son tour divisée en 2 sous zones A et B. Le produit stocké est le gaz- oïl avec une capacité de 26 407m³.

La Zone 2 stocké Kérosène (Jet) et la zone 3 stockent les essences (Normal, Super, Sans plomb) avec une capacité totale de 24 633 m³.

Chaque zone de stockage est entourée par une cuvette de rétention en merlan de terre et un fond en béton, d'une hauteur de 2 m.

Le produit réceptionné est stocké dans des bacs aériens de différentes capacités, à toit fixe. Afin de déterminer les quantités de produits à réceptionner, un jaugeage des bacs est effectué par l'opérateur du centre.

La commande du produit est faite à J-1 au niveau du service commande. Le dispatcheur établit son programme de distribution du jour J en fonction de la disponibilité des camions citernes et des chauffeurs pour approvisionner les stations-services et les dépôts carburants.

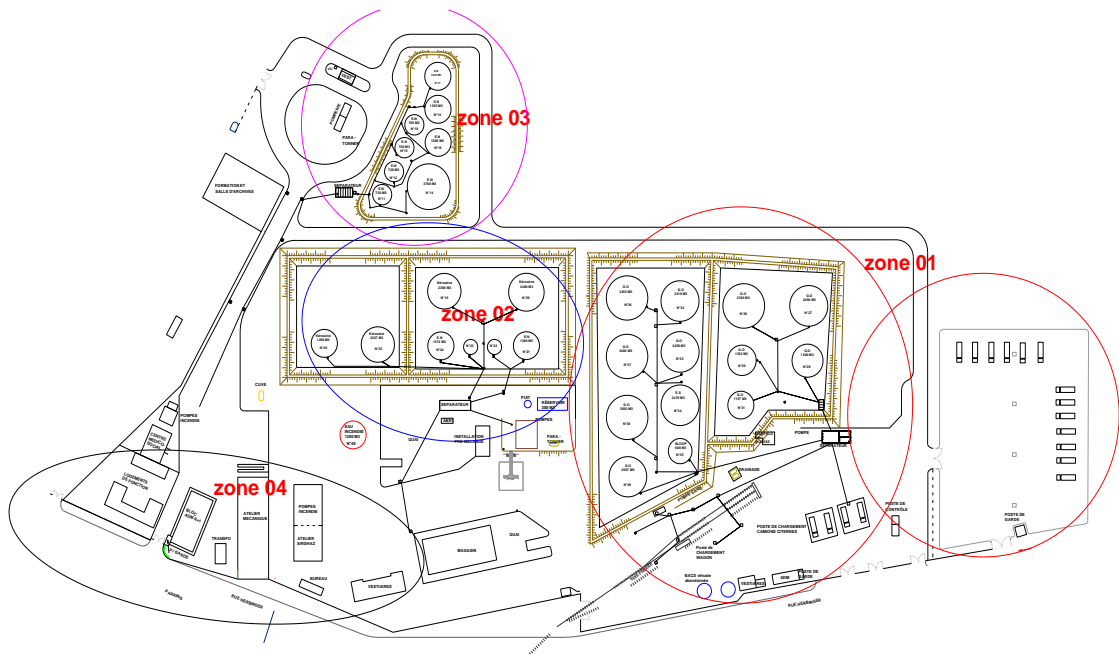


Figure 14 : Identification des différentes zones de stockage sur plan masse

- 1 : Zone stockage gasoil et poste de chargement ;
- 2 : Zone de stockage kérosène et poste de chargement en source ;
- 3 : Zone de stockage essence ;
- 4 : ADM, atelier et poste de transformation.

II-3-7 Zone de pomperie

Cette zone est constituée d'une salle de pompe servant à pomper les carburants stockés de la zone de stockage vers la zone de chargement. Dans le cadre de l'activité de transport et approvisionnement de la région Ouest en carburants, NAFTAL dispose de deux Terminaux départ à l'intérieur de la Raffinerie d'Arzew alimentant les centres d'Oran, SBA et Remchi. La Raffinerie d'Arzew comporte : 06 bacs tampons au niveau de la zone 28 de la Raffinerie d'Arzew pour alimenter les deux stations de pompages NAFTAL : Gasoil : 02 Bacs de 40000 m³, Essence Normal : 01 Bac de 20000m³, Essence Super : 01 Bac de 20000m³ Jet A1 : 02 Bacs de 30000m³.

La zone de pomperie ainsi que les pompes qui la constitue sont soumises à la réglementation ATEX et sont faites de façons faire tendre le risque électrique vers zéro.

Le dépôt carburant est équipé de 03 salles des pompes :

- ✓ Salle N°I : Produit Kérosène (AVM).
01 Pompe 100 m3 /H.
- ✓ Salle N°II : Produit Gas-oil et essence super pour les wagons.
01 Pompe 100 m3 /H.
01 Pompe 100 m3 /H.
- ✓ Salle N°III : Produit Essences normal, super, sans plomb, Gas-oil pour les camions.
04 Pompes type WORTHINGTON.
02 Pompe 100 m3 /H : opérationnelle.
02 Pompe 100 m3 /H : à l'arrêt.

II-3-8 Postes de chargement

Le centre CDS 317 PETIT LAC comporte trois postes de chargement : le premier poste est réservé pour le chargement des wagons citerne, équipé de 05 Bras Ø 4". 02 Postes de chargement à 02 voies (Chaque poste est équipé de 10 Bras Ø 4").

Le remplissage dans la zone de chargement se fait soit dans des camions ou bien des wagons citernes. Les capacités des camions citernes peuvent aller de 21 000 m³ jusqu'à 31 000 m³ repartis en 4 à 5 compartiments. Les wagons citernes possèdent une capacité de stockage qui peut aller jusqu'à 65 m³ par wagon.

Le remplissage ou le chargement des citernes est effectué par l'OMP (Opérateur Mouvement Produit), cette dernière monte sur une plateforme surplombant les citernes et positionne le bras de chargement au niveau de l'entrée de la citerne et actionne la vanne qui permet l'écoulement du produit. L'OMP procède aussi à la vérification du niveau du produit à travers un sabre de jaugeage.

II-4 Possibilité de formation d'une ATEX dans le système étudié

ATEX possible en zone 0

- Installation génératrice de vapeurs explosives (filtre presse, chargement de camion, ...).
- Intérieur de récipients ou d'appareils : à proximité d'évents ou d'ouvertures.

ATEX possible en zone 1

- Echappements à l'atmosphère des soupapes.
- Orifices de respiration, événements sur bacs de stockages, postes de chargement, égouts.
- Presses étoupes de vannes.
- Extrémités des lignes de purges ou de prises d'échantillon

ATEX possible en zone 2

- Détérioration d'une garniture de pompe.
- Rupture d'un joint défectueux ou mal monté.
- Fausse manœuvre.
- Utilisation d'un équipement temporaire : flexible...etc.
- Débordement accidentel : réservoir, camion, wagon.

Exemples de zones classées au sein de système étudié

Les bacs de stockage

- Zones de type 1 et 2 engendrées par les orifices des soupapes d'une enceinte contenant des hydrocarbures classe I B (essence)

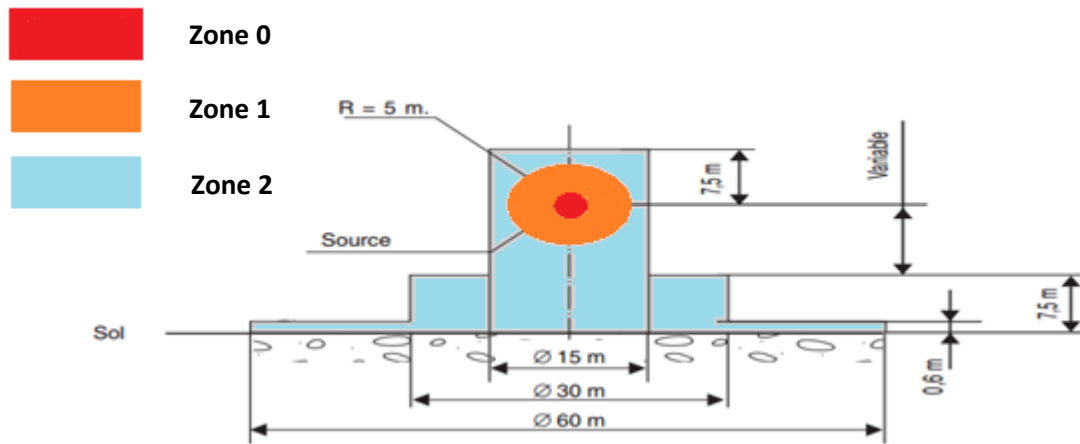
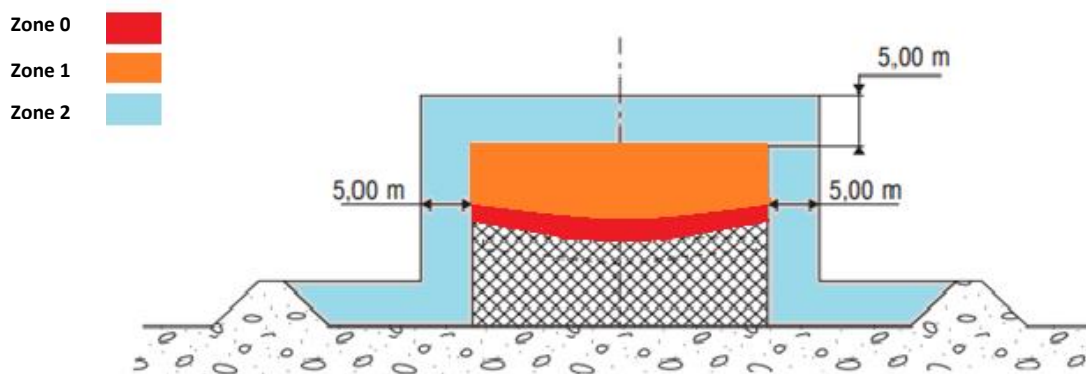


Figure 15 : Modélisation 2D d'une dispersion des vapeurs inflammables autour d'un orifice

- Zones de type 1 et 2 engendrées par un réservoir à toit flottant contenant des



hydrocarbures de classe 1 B (essence).

Figure 16 : Identification 2D des zones classées autour d'un bac à toit flottant

Les zones de types 1 et 2 engendrées par les différents accessoires (joints, orifices de respiration, purges, etc.) ne sont pas représentées.

II-4-9 Poste de chargement

Camion-citerne contenant un liquide inflammable type I B (essence). Zone engendrée par :

- Les positions extrêmes des centres des orifices de chargement utilisés des moyens de transport en position de chargement

- Le centre de l'orifice du bras ou du flexible de chargement en position de repos

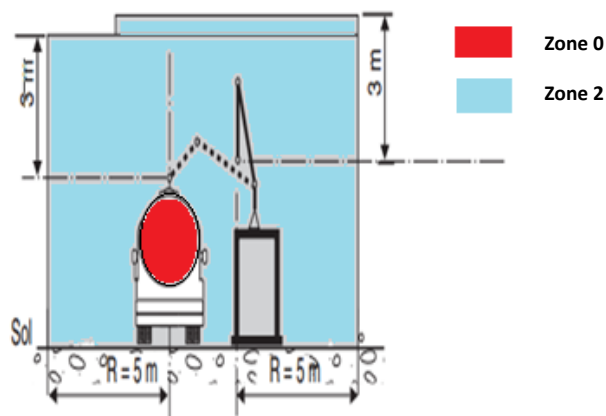


Figure 17 : Vu transversale des zones à risque autour d'un poste de chargement en cas de repos

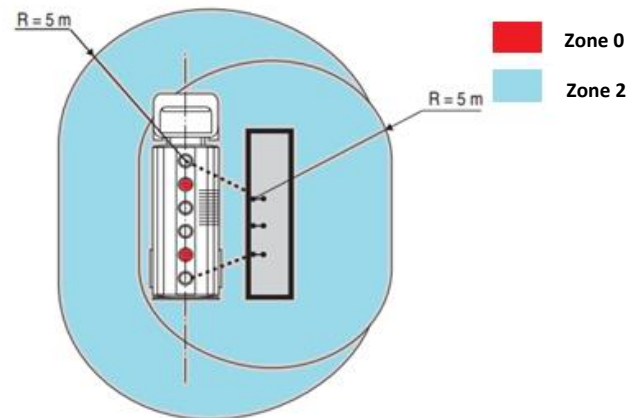


Figure 18: Vu de dessus des zones à risque autour d'un poste de chargement en cas de repos

Nota : zones identiques pour un poste de chargement de wagons-citernes.

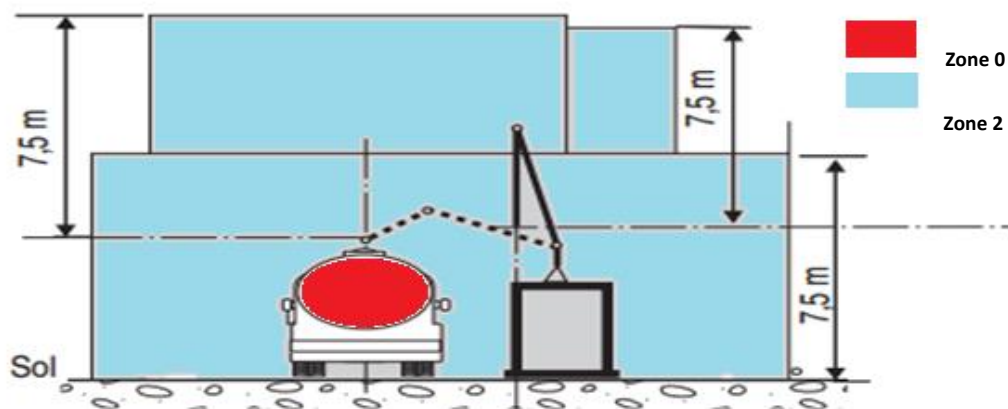


Figure 19 : Vu transversale des zones à risque autour d'un poste de chargement en cas de repos

Chapitre 02 : Présentation du groupe NAFTAL

Zone engendrée par les orifices d'émission possibles aux postes de chargement d'hydrocarbures de catégorie B, C1, D1 pendant la durée des opérations.

Volumes limités par :

- ✓ Le sol
- ✓ Deux cylindres de révolution ayant pour axe commun une verticale passant par la source et pour rayon 7,50 m et 15 m
- ✓ Deux plans horizontaux situés respectivement à 7,50 m au-dessus de la source et 7,50 m au-dessus du sol.

Cylindre	Rayon de cylindre	Cotes de plans (m)
1	7.5	7.5 au-dessus de la source
2	5	7.5 au-dessus du sol

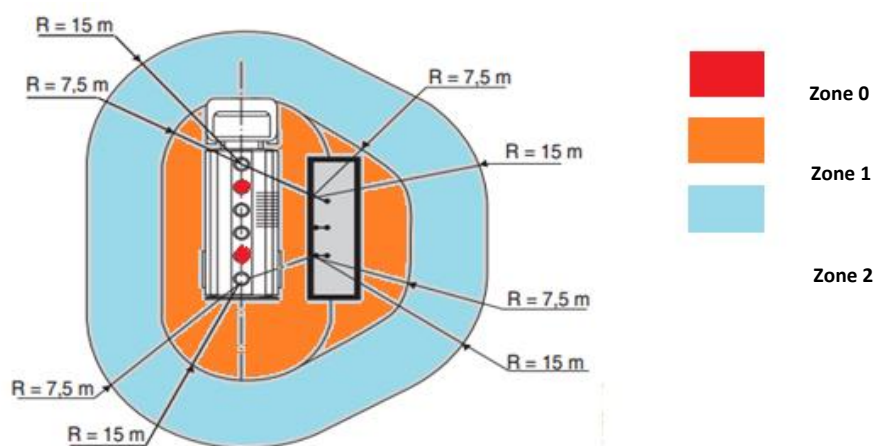


Figure 20 Vu de dessus des zones à risque autour d'un poste de chargement au cours de remplissage

Chapitre 03 : Analyse du risque des produits inflammable dans un bac de stockage

III-1 Introduction

Dans ce chapitre, L'ADD a été établie avec un diagramme Ishikawa afin de faire un inventaire des principales sources d'émission de mélange air-combustible et principales sources d'inflammation dans un bac de stockage. Ensuite une modélisation des scénarios les plus redouté par le logiciel Phast.

III-2 Arbre de défaillances (ADD)

Méthode appelée aussi Arbre de dysfonctionnements, Arbre des défauts, "Fault Tree Analysis" La méthode des arbres de défaillance (aussi appelé Arbre des Causes, Arbre des Fautes ou encore Arbre des Défauts) a été introduite par Watson, en 1961, au sein de la société Bell Telecom, afin d'évaluer et d'améliorer le système de lancement de missile "Minuteman" au profit de l'US Air Force. Utilisée dans un premier temps uniquement comme outil de représentation des défaillances des systèmes, cette méthode n'a cessé d'évoluer, aussi bien d'un point de vue méthodologie de construction, que d'un point de vue traitement qualitatif et quantitatif du modèle ainsi obtenu.

III-2-1 Objectif

- À partir d'un événement final indésirable, rechercher les combinaisons des différents événements élémentaires ou défaillances qui peuvent y conduire
- Réduire la probabilité d'occurrence de cet événement final

III-2-2 Mise en œuvre de la méthode

Principe

- Définir l'événement final indésirable
- Représenter graphiquement les combinaisons d'événements par un "arbre"
- Arbre formé de niveaux successifs tel que chaque événement soit généré à partir d'événements inférieurs par l'intermédiaire de portes logiques "ET" et "OU"
- Se poser la question : "qu'est-ce qu'il faut pour que l'événement se produise ?"
- Construction de l'arbre arrêtée lorsque les événements élémentaires :
 - sont indépendants entre eux
 - leur probabilité peut être estimée
 - il est décidé de ne pas les décomposer en combinaison d'événements plus simples

Déroulement

- Définition de l'événement final indésirable
- Étude de système
- Construction de l'arbre
- Exploitation de l'arbre :
 - évaluation de la probabilité des événements élémentaires
 - calcul de la probabilité de l'événement final
 - mise en évidence des chemins critiques

Modification de la structure de l'arbre par adjonction de barrières supplémentaires

III-2-3 REPRESENTATION GRAPHIQUE

La méthode des arbres de défaillance est avant tout un outil graphique qui permet de visualiser clairement les causes d'un événement donné à l'aide d'une structure arborescente. Différents symboles graphiques sont utilisés pour la représentation des événements de l'arbre.








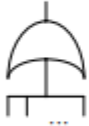
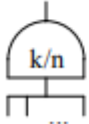
Symbole graphique	Signification du symbole
	Événement intermédiaire Les causes de cet événement sont développées.
	Événement de base élémentaire Ne nécessite pas de futur développement. Exemple : Défaillance première d'un composant
	Événement de base non élémentaire Ne peut être considéré comme élémentaire, mais ses causes ne sont pas et ne seront pas développées.
	Événement à développer Ne peut être considéré comme élémentaire. Ses causes ne sont pas développées, mais le seront ultérieurement.
	Événement "Maison" Survenant normalement pendant le fonctionnement du système.
	Événement "Condition" Utilisé avec certaines portes afin de préciser la condition à satisfaire pour que l'opération logique réalisée par chacune de ces portes s'effectue.

Figure 21: Représentation des événements

La structure arborescente est réalisée à l'aide de portes (ou opérateurs). Chaque type de porte représente la relation de causalité entre les événements d'entrée de la porte et son événement de sortie. Par exemple, tous les événements d'entrée d'une porte "Et" doivent être réalisés

Chapitre 03 : Analyse du risque des produits inflammable dans un bac de stockage

pour que son événement de sortie soit réalisé. Les portes les plus représentatives sont décrites ci-dessous. Les portes fondamentales sont la porte "Et", la porte "Ou" et la porte "K-sur-N".

Symbole graphique	Signification du symbole
	Porte "Et" L'événement de sortie est réalisé si toutes les événements d'entrée sont réalisés.
	Porte "Ou" L'événement de sortie est réalisé si au moins un des événements d'entrée est réalisé.
	Porte "K-sur-N" (ou porte combinaison) L'événement de sortie est réalisé si au moins K des N événements d'entrée sont réalisés.

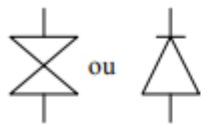
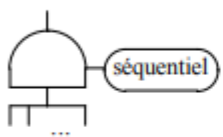
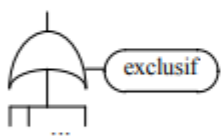
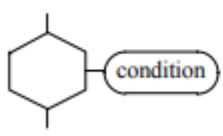
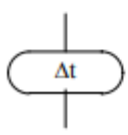
Symbole graphique	Signification du symbole
	Porte "Non" L'événement de sortie est réalisé si l'événement d'entrée ne l'est pas.
	Porte "Et avec condition" L'événement de sortie est réalisé si toutes les événements d'entrée sont réalisés et si la condition est réalisée. Ici, il faut aussi que les événements d'entrée apparaissent séquentiellement.
	Porte "Ou avec condition" L'événement de sortie est réalisé si au moins un des événements d'entrée est réalisé et si la condition est réalisée. Ici, l'événement de sortie est réalisé si un et un seul des événements d'entrée est réalisé.
	Porte "Si" L'événement de sortie est réalisé si l'événement d'entrée est réalisé et si la condition est réalisée.
	Porte "Délai" L'événement de sortie est réalisé si l'événement d'entrée est réalisé depuis et pendant Δt .

Figure 22: Représentation des portes

Chapitre 03 : Analyse du risque des produits inflammable dans un bac de stockage

Il existe dans la littérature de nombreuses autres portes utilisées dans des applications particulières. Les portes "Quantification", "Somme" et "Comparaison" [Vil88] sont utilisées afin d'évaluer les pertes d'exploitation sur des lignes de production. Les portes "Redondance passive" et "Séquentielle généralisée" [DSC00] servent dans la description d'arbres de défaillance dynamiques. Pour finir, il existe des symboles appelés renvois de sous-arbres (aussi appelé transferts de sous-arbres) qui sont utilisés pour éviter de répéter les sous-arbres identiques ou semblables.

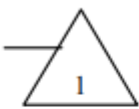
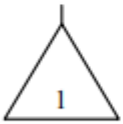
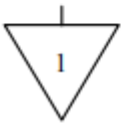
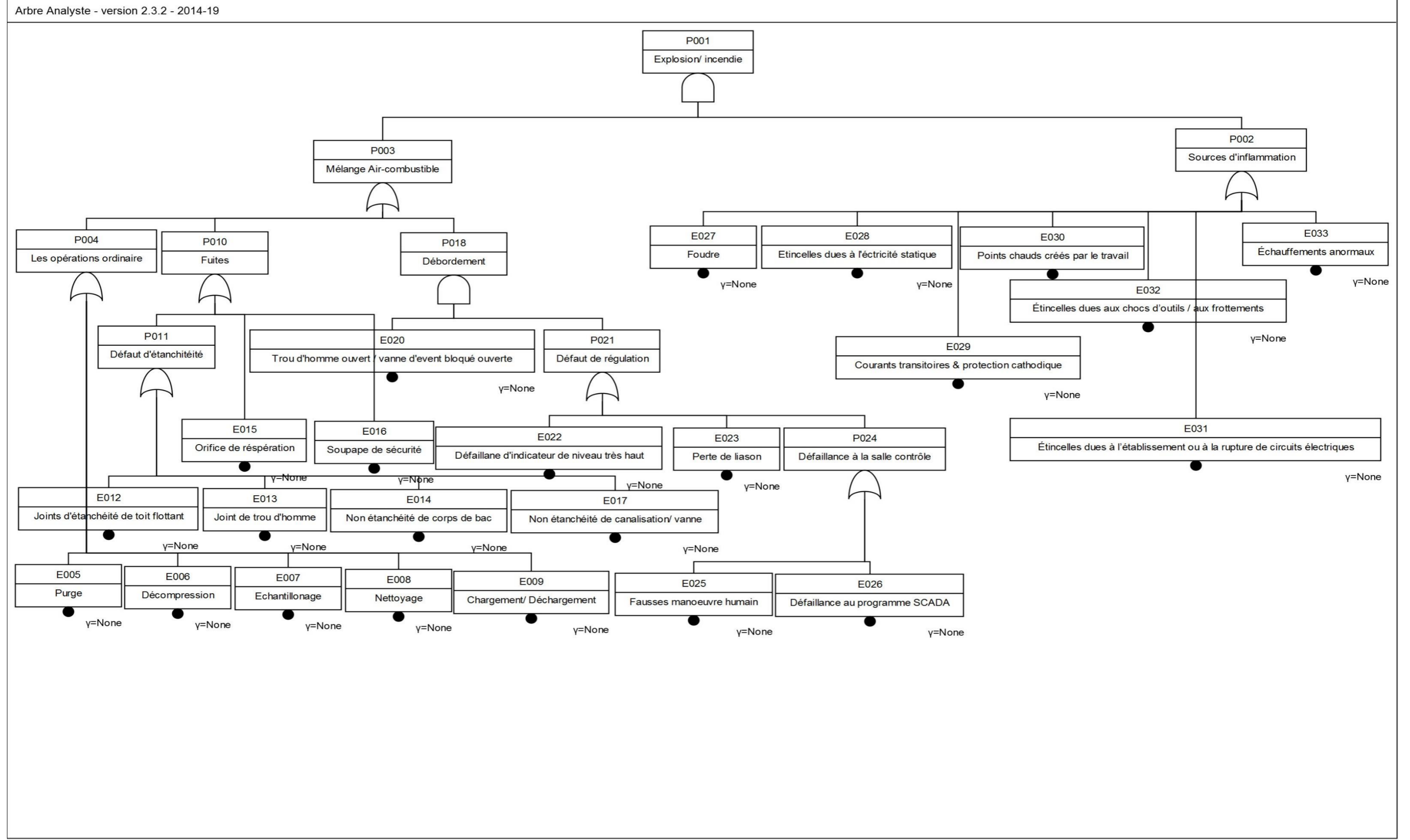
Symbole graphique	Signification du symbole
	Identificateur de renvoi Le sous-arbre commençant par l'événement d'entrée de l'identificateur est transféré aux emplacements signalés par le ou les renvois associés à l'identificateur. Plusieurs renvois peuvent être en liaison avec le même identificateur.
	Renvoi identique La partie de l'arbre qui devrait suivre est identique à celle définie après l'identificateur de renvoi associé.
	Renvoi semblable La partie de l'arbre qui devrait suivre est semblable à celle définie après l'identificateur de renvoi associé.

Figure 23: Représentation des transferts ou renvois

Un renvoi semblable sert à décrire succinctement un sous-arbre ayant la même structure que le sous-arbre de référence, mais qui représente un système différent. Par exemple, le système de navigation d'un avion de ligne peut comporter deux pilotes automatiques. Ils peuvent être rigoureusement similaires, mais ils seront physiquement différents. La défaillance d'un des composants peut provoquer une défaillance d'un des systèmes de pilotage automatique, mais pas de l'autre. L'utilisation des renvois semblables permet donc de schématiser rapidement une installation redondante

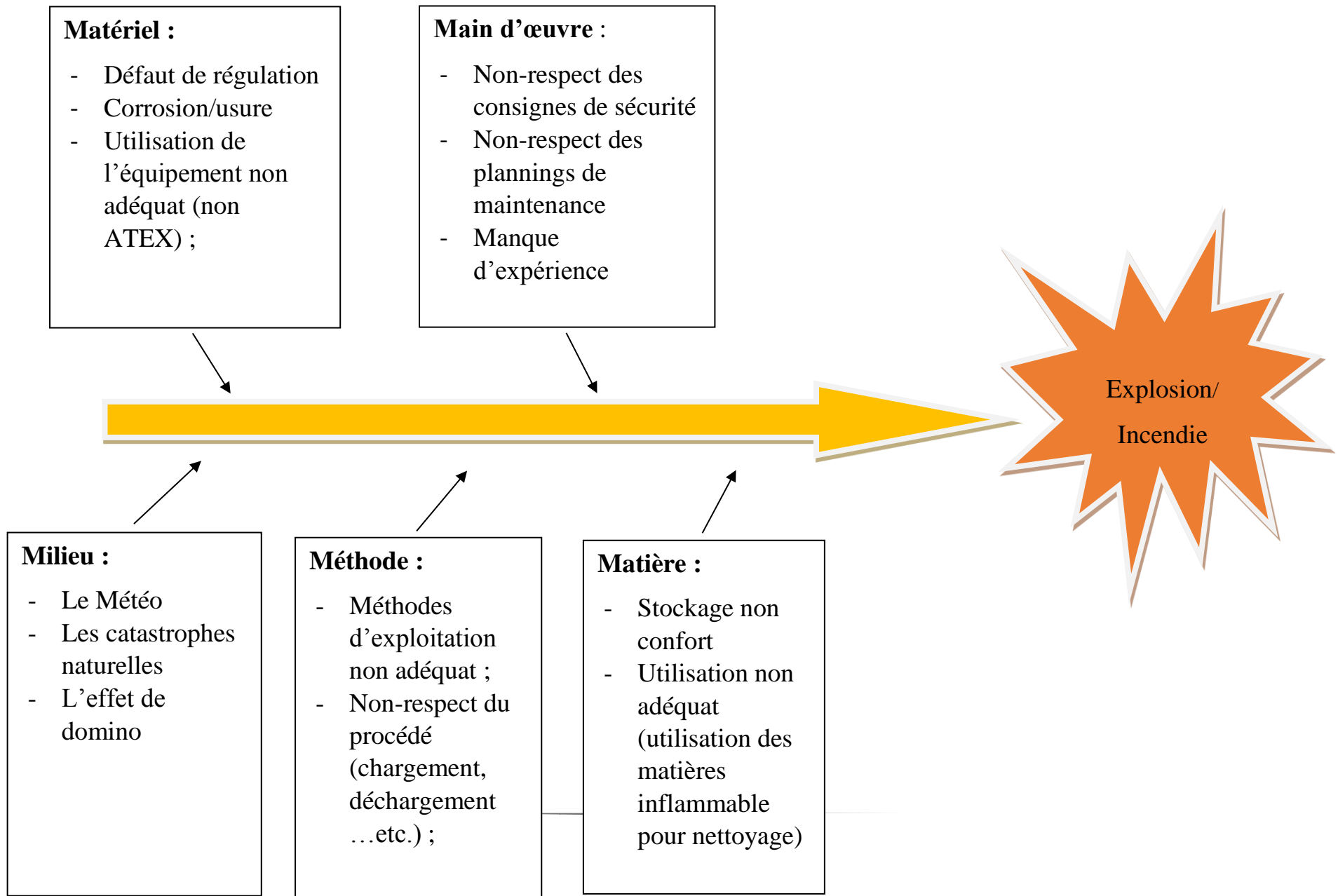


III-3 Méthode d'Ishikawa (cause-effet)

Il s'agit d'un outil de gestion de la qualité largement utilisé puisqu'il guide la prise de décision en s'attaquant aux bases qui déterminent les mauvaises performances.

La structure du diagramme d'Ishikawa est intuitive : il identifie un problème ou un effet et énumère ensuite un ensemble de causes qui expliquent potentiellement ce comportement. En outre, chaque cause peut être décomposée plus en détail en sous-causes. Ce qui est utile pour prendre des mesures correctives, car il faut s'attaquer précisément au phénomène qui explique le comportement indésirable.

- Le diagramme de causes et effets permet de représenter graphiquement et d'analyser les grandes catégories de causes pour parvenir à un effet particulier.
- Il est particulièrement bien adapté à la gestion des risques qui fait partie de la gestion du projet.
- Construire le diagramme d'Ishikawa permet également de découvrir les interdépendances entre les causes pour pouvoir ensuite les améliorer afin d'obtenir l'effet désiré ou les éliminer pour résoudre un problème.
- Il permet aussi de découvrir les zones où nous manquons de données.



III-4 Synthèse des résultats ADD et Ishikawa

L'analyse ADD nous a permis de considérer des combinaisons d'événements pouvant conduire en fin à un événement redouté (explosion/incendie). Ce qui permet une bonne adéquation avec l'analyse des risques d'explosion qui montre que les événements majeurs observés résultent le plus souvent de la conjonction de plusieurs paramètres qui seuls n'auraient pu entraîner de tels sinistres.

La méthode d'Ishikawa permet de rechercher l'ensemble des « causes racines ». Ainsi qu'il permette une visualisation des causes de l'explosion et l'incendie au niveau du bac qu'il convient de traiter prioritairement.

III-5 Quantification de la sévérité de potentielle danger par logiciel PHAST

Logiciel PHAST nous permettons de modéliser des scénarios catastrophique (à cause d'une rupture, d'une fuite...) des réceptions des matières inflammables. Pour enrichir notre étude on a choisi deux scénarios pour savoir les effets de ces scénarios catastrophiques et les analyser

III-5-1 Les données de la modélisation

Bac	Volume	4000 m³
	Hauteur	10 m
	Matière stockée	Essence sans plomb
	Température	15 °C
Météo	Pression	Pression atmosphérique (1.01325 bar)
	Vitesse de vent	5m/s
	Température ambiante	20 °C

III-5-2 Rapport de synthèse des conséquences

Scénario N°1

Le scénario développé dans cette section suit la chronologie suivante :

Une rupture catastrophique au niveau de bac de stockage de l'essence.

Résultat de scénario N°1

Chapitre 03 : Analyse du risque des produits inflammable dans un bac de stockage

Les figures ci-dessous permettent d'identifier les zones touchées selon la nature de conséquence.

Une dispersion de nuage de vapeur

La dispersion de nuage de vapeur engendré par une rupture catastrophique dépasse le périmètre de l'entreprise et atteint jusqu'à la zone urbaine comme il est illustré dans la figure suivante



Figure 24 L'effet maximal de dispersion de vapeur engendré par une rupture

Flash Fire

Tableau 9 : Distance sous le vent pour des concentrations définies

Scenario	Distance downwind to LFL [m]	Distance downwind to LFL Fraction [m]
Rupture Catastrophique	132,612	186,561

Tableau 10 : Distance maximale à la fraction LFL n'importe quel auteur

Scenario	Max flash fire distance [m]	Height of the max flash fire distance [m]	Time [s]
Rupture Catastrophique	186,129	0	38,5539

Chapitre 03 : Analyse du risque des produits inflammable dans un bac de stockage

Le cercle bleu sur la figure 25 représente la Limite Inferieure d'inflammabilité (LII) et le Cercle vert la Limite supérieur d'inflammabilité (LSI). Ce schéma montre la distance atteint par le feu de flash



Figure 25 La zone atteint par le feu de flash

Une explosion

La figure ci-dessus représente les zones touchées par les ondes de pression d'où il faut prévoir des mesures de sécurité au-delà du cercle bleu pour une intervention sécurisée.



Figure 26 : Explosion du nuage de vapeur causé par une rupture

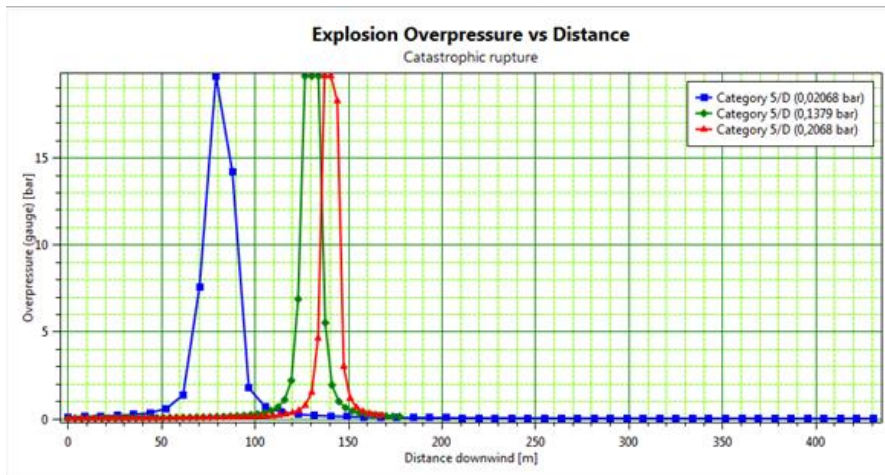


Figure 27 Graphe montre la surpression engendrée par une rupture catastrophique

Tableau 11 : distance maximale de surpression

Scenario	Overpressure level [bar]	Maximum distance [m]	Diameter [m]
Catastrophic rupture	0,02068	481,699	763,397
	0,1379	200,571	101,142
	0,2068	189,475	58,9505

Scénario N°2

Le scénario développé dans cette section suit la chronologie suivante :

Fuite de 100 mm au niveau du toit du bac de stockage

Résultat de scénario N°2

Jet enflammé

Tableau 12 : L'intensité de radiation de jet enflammé.

Scenario	Flame length [m]	Distance downwind to intensity level 1 (4 kW/m ²) [m]	Distance downwind to intensity level 2 (12,5 kW/m ²) [m]	Distance downwind to intensity level 3 (37,5 kW/m ²) [m]
Leak	37,4428	93,4914	54,2416	n/a

La figure ci-dessous montre la zone touchée par les radiations thermiques, d'après ce résultat on remarque que les radiations thermiques engendré par le feu torche atteignent une distance de 93 m à partir du bac d'où il faut prévoir des mesures de sécurité à partir de cette distance.

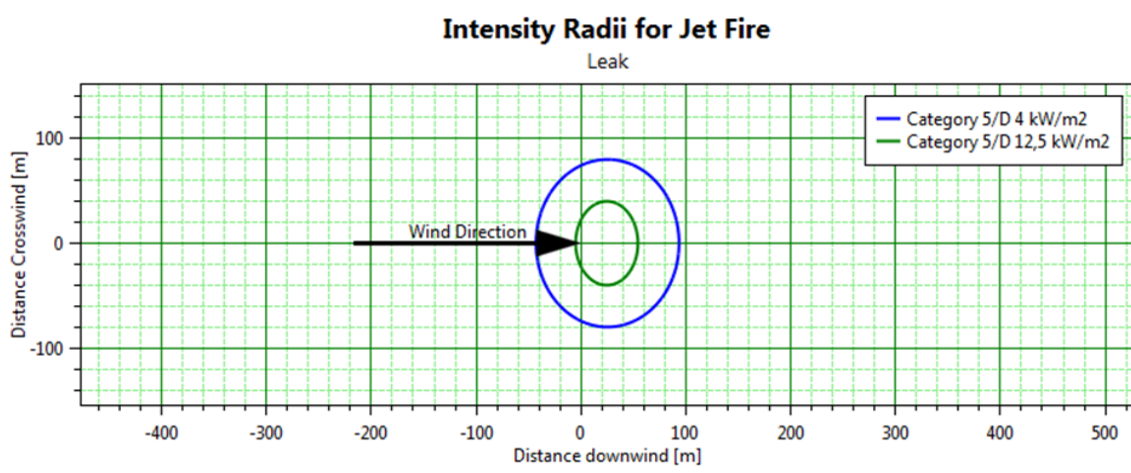


Figure 28 : Distance atteintes par les radiations de jet enflammé

Pool Fire

Early Pool Fire

La figure suivante montre les zones touchées par les radiations thermiques engendré par le (feu de nappe immédiate) early pool fire au-delà du cercle bleu commence la distance de sécurité.



Figure 29: Early Pool Fire produite par une fuite

Late Pool Fire

Cette figure montre l'effet thermique d'un feu de nuage inflammable qui atteint 700m à partir du centre du bac (12.5 kW/m^2 à une distance de 400m et 4 kW/m^2 à une distance de 700m)



Figure 30 : L'effet thermique d'un feu de nuage inflammable

Une explosion

La figure suivante représente les zones touchées par les ondes de pression engendrées par l'explosion



Figure 31 : Explosion du nuage de vapeur causé par une fuite

Tableau 13 : distance maximale de surpression

Scénario	Overpressure level [bar]	Maximum distance [m]	Diameter [m]
Fuite	0,02068	261,534	423,067
	0,1379	91,113	82,226
	0,2068	80,825	61,6499

III-5-3 Synthèse de la simulation

La modélisation des conséquences escomptées des deux scénarios au niveau du bac de stockage des produits inflammable, la rupture catastrophique ainsi qu'une fuite au niveau du toit de ce dernier, nous a permis d'élargir notre vision concernant les dommages encourus. Il paraît impératif de considérer avec méfiance les valeurs disponibles car, en se basant sur ces résultats, on constate que pratiquement toutes les conséquences seraient catastrophiques et cela pourrait entraîner l'endommagement de plusieurs équipements avoisinants (effets dominos),

Les effets de l'explosion et des radiations thermique pouvaient impacter l'ensemble des bâtiments présents sur le site et mener ainsi à des blessures sévères ou même à la perte de plusieurs vies humaines, tels-que les opérateurs présents sur le site au moment de l'accident.

Chapitre 04 : Mise en place des barrières de sécurité

IV-1 Introduction

Après avoir évalué les risques et modélisé les scénarios catastrophiques liés au stockage des produits inflammables dans le chapitre précédent, nous avons consacré ce chapitre à la proposition des mesures de protection contre ces événements redoutés afin de réduire les impacts potentiels en cas d'accidents.

IV-2 Mesures de prévention et de protection

La suppression du risque d'explosion doit être recherchée en limitant l'occurrence et le volume d'une atmosphère explosive et en agissant sur les sources d'inflammation, et pour garantir une suppression du risque, des mesures de protection contre les effets des explosions sont à mettre en œuvre.

L'employeur doit également estimer les conséquences potentielles d'une explosion. Cette estimation permettant de débattre des priorités et d'aider à la planification des actions de prévention.

IV-2-1 Éviter la formation d'une ATEX

Actions sur le combustible

- Maintenir la concentration du combustible hors de son domaine d'explosivité par :
- Captage des vapeurs par aspiration au plus près de leur source d'émission
- Dilution à l'air
- Contrôle des concentrations en combustible par la mise en place d'un dispositif de détection et de surveillance vérifié et calibré régulièrement...

Action sur le comburant

Mise à l'état inerte, l'introduction d'un gaz d'inertage (par exemple, l'azote) en proportion suffisante dans le ciel de réservoir entraîne son appauvrissement en oxygène et rend donc l'inflammation impossible.

Les différents gaz inertes utilisés sont :

L'azote, le dioxyde de carbone, rarement la vapeur d'eau, les hydrocarbures halogénés, l'hélium, l'argon.

IV-2-2 Éviter l'inflammation des ATEX formées

Action sur les sources d'inflammation potentielles :

Chapitre 04 : Mise en place des barrières de sécurité

En premier lieu il faut mettre les appareils hors zone Atex le plus possible, puis on élimine les sources d'inflammation potentielles :

Flamme

- Pas d'allumettes, de briquets dans les zones à risques ;
- Pas de travaux de feux sans permis. Prévoir au minimum, si le travail est autorisé, un extincteur portatif à proximité (quelques mètres).

Foudre

Vérification :

- De l'étanchéité des soupapes de sécurité et des événements vers l'atmosphère ;
- Des arrêtes-flammes ;
- Des joints de bacs à toit flottant.

Par temps d'orage :

- Eviter purges, prises d'échantillon, jaugeage de bac, ...
- N'effectuer aucun branchement ou débranchement sur navire, wagons-citernes, camions citernes ;
- Suspendre toute opération de chargement en dôme des camions et wagons ;
- De plus fermer les capots, dômes, couvercles, ...

Étincelle due à l'électricité statique

Pour obtenir la suppression des charges électrostatiques et donc les risques d'étincelles, on doit relier tuyauterie et capacité par une liaison équipotentielle de façon à favoriser la circulation de l'électricité puis de réaliser une mise à la terre efficace ($R < 20 \Omega$).

En effet, la terre étant une réserve inépuisable de charges électriques, elle peut en céder ou en recevoir indéfiniment. Il convient donc de respecter des temps de rééquilibrage électrique plus ou moins longs suivant que l'on a des corps isolants ou conducteurs.

Ces liaisons équipotentielles concernent :

- ✓ Les EPI du personnel en usine : pas de vêtements générateurs d'électricité statique, chaussures "antistatiques" ($R \cong 10^6 \Omega$)
- ✓ Les capacités (ballons, bacs, ...)
- ✓ Les tuyauteries : entre brides la continuité électrique est assurée par Les tiges filetées ou par pontage

- ✓ Les flexibles dont la continuité électrique doit être assurée (fil conducteur incorporé, etc.)
- ✓ Les courroies d'entraînement de machines qui doivent être rendues conductrices par incorporation des fils métalliques ou par utilisation de caoutchouc conducteur

Étincelles dues à l'établissement ou à la rupture de circuits électriques

Pour supprimer ces sources d'inflammation, les appareils électriques et non électriques doivent être conformes à la réglementation relative à la conception des appareils et systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosive (voir ANNEXE 3) ;

- Interdiction de connecter la prise de masse d'un groupe électrique de soudage à l'arc sur une tuyauterie ou une capacité contenant des combustibles.
- Étincelles dues à la mise en contact accidentelle des conducteurs sous tension : ne pas faire passer de câbles au-dessus de tuyauteries, de réservoirs, ...
- Consigner les appareillages électriques avant d'intervenir ou faire un contrôle d'explosivité avant intervention.

Points chauds créés par les interventions de maintenance

On appelle travail à chaud, tout travail dont l'exécution nécessite l'utilisation d'appareils ou d'outils générateurs de flammes, d'étincelles ou peut faire apparaître des surfaces ou des points susceptibles d'être portés à des températures élevées (points chauds).

Prévention/ précaution :

Tout travail à chaud, doit faire l'objet d'un permis ou bon de feu.

Parallèlement, lors des travaux à chaud et principalement durant le découpage au chalumeau et le meulage, des étincelles peuvent être projetées aux alentours du point d'intervention.

La procédure de permis (ou d'autorisation) de travaux permet de s'assurer que toutes ces opérations préliminaires ont été correctement effectuées, y compris la délimitation matérielle des zones temporaires à risque d'explosion.

Précautions :

- Tenir compte du vent
- Protéger par des bâches ignifugées ou un dispositif équivalent (matelas de mousse incendie, plâtrage) le matériel se trouvant à proximité, les drains, les caniveaux, regards d'égouts
- Interdire toute manœuvre sur les équipements (purge, prise d'échantillons, ...)

- Disposer du matériel de première intervention (extincteurs, ...)
- Eviter les découpes à chaud des tuyauteries (même “dégazées”) et préférer l’utilisation d’un coupe-tube
- Utiliser le sablage humide

Étincelle due au choc d’outils/frottement

Choc d’outil

Utiliser des outils en cuivre-béryllium dits anti-étincelles.

Néanmoins, l’usage de ces derniers ne supprime pas tout danger.

L’expérience montre que les particules arrachées de l’outil ne donnent pas d’étincelles, mais que les parties détachées des pièces métalliques ou du béton sur lesquels frappe l’outil sont des étincelles.

Dans une certaine mesure, on peut supprimer ces étincelles par humidification du lieu de travail.

Frottement

Prévoir des protecteurs d’accouplement anti-étincelles sur les machines tournantes.

Échauffements anormaux

- Surveiller en particulier les machines tournantes (surtout les pompes), vibrations, frottements (suivi des appareils de contrôle, haute température huile de butée, ...) et les nettoyer régulièrement (exemple : grille ventilateur d’un moteur électrique)
- Mise en place des mesures de contrôle :
 - Détecteurs d’élévation de température, de pression ;
 - Détecteur CO (monoxyde de carbone, dont la présence indique une réaction de combustion) ;

IV-2-3 Limitation des effets des explosions de gaz et de vapeurs

La protection des enceintes et de leur environnement contre les effets d’explosions internes qui n’ont pu être prévenues utilisent les moyens suivants :

Événements d’explosion

Une fraction déterminée de la surface de leurs parois est ouverte ou moins résistante, de manière à permettre l’évacuation des gaz d’explosion et à ne soumettre l’enceinte qu’à une pression résiduelle supportable.

Suppression d'explosion

Un suppresseur d'explosion est un système d'extinction très rapide (opère en quelques dizaines de ms seulement) injectant de la poudre ou de l'eau micronisée en amont d'une explosion

Les systèmes d'isolement

Un système d'isolement permet d'empêcher la propagation de la flamme d'une explosion (comme les arrête-flammes, les vannes d'isolement, les écluses rotatives)

Isolation (découplage) des installations

Isolation des équipements / bâtiments

IV-3 Le document relatif à la protection contre les explosions (DRPCE)

Vu que les bacs de stockage et le poste de chargement comprennent des risques importants dans ce site l'élaboration d'un DRPCE est essentielle pour garantir la sécurité et la santé des travailleurs en atmosphère inflammable, dont ce dernier est un élément clef de la démarche de mise en conformité ATEX

IV-3-1 Hiérarchisation des risques

La hiérarchisation des risques d'explosion est réalisée à partir de la combinaison de deux critères :

- La probabilité de réalisation du risque d'explosion,
- La gravité des conséquences d'une explosion.

IV-3-2 Probabilité de réalisation du risque d'explosion

Ce critère combine à la fois :

- La probabilité de présence d'une atmosphère explosive (ATEX), qui correspond au type de zone (0, 1, 2)
- La probabilité de présence d'une source d'inflammation capable d'enflammer un mélange de substances inflammables donné.

Tableau 14 : probabilité de présence d'une atmosphère explosive

Niveau de probabilité d'apparition d'une ATEX « X »	Zone ATEX
3	Présence d'une zone 0
2	Présence d'une zone 1
1	Présence d'une zone 2
0	Installation Hors Zone

Tableau 15 : probabilité de présence d'une source d'inflammation

Niveau de probabilité de présence d'une source d'inflammation « S »	La présence d'une source d'inflammation
3	Présence de sources d'ignition non maîtrisées
2	Présence de sources d'ignition maîtrisées
1	Absence de sources

IV-3-3 Exposition

Le critère d'exposition prend en compte ou à proximité immédiate des zones à risque d'explosion.

Tableau 16: Niveau de la gravité d'exposition

Niveau de gravité « E »	La présence de personnel sur le lieu
3	Présence permanente
2	Présence fréquente et régulière
1	Pas de personnel présent en fonctionnement normal

IV-3-4 Gravité

Ce critère précise l'étendue des conséquences prévisibles d'une explosion sur le personnel.

Tableau 17 : Niveau de gravité

Niveau de gravité « G »	Gravité	Conséquence
3	Majeure	Risque de mort ou blessures graves
2	Mineure	Risque de blessures légères

1	Faible	Effets non significatifs
---	--------	--------------------------

IV-3-5 Evaluation du niveau de criticité du risque d'explosion

Cette grille permet de hiérarchiser la criticité du risque pour le cas étudié.

$$\text{Niveau de criticité} = X * S * E * G$$

Tableau 18 : Niveau de criticité

Niveau de criticité NC »	Commentaire
Niveau de risque acceptable <10	Des améliorations non prioritaires pourront être envisagées
Niveau de risque moyen <25	Des améliorations devront être mises en place
Niveau de risque non acceptable >25	Des améliorations sont à mettre en œuvre d'urgence

Chapitre 04 : Mise en place des barrières de sécurité

Document Relatif à la Protection Contre les Explosions										
Zone : 3					Date : 06/07/2021					
Installation : bac de stockage et poste de chargement										
	Fréquence d'apparition du risque d'explosion									
Equipement/source de dégagement	Sources d'inflammation	Type de zone ATEX	Mesures de prévention mises en place	Gravité du risque d'explosion					Amélioration à mettre en œuvre	
				X	S	E	G	C		
Ciel du réservoir	-Étincelles électriques provenant d'un appareil installé dans le réservoir (jauge de niveau...) ou surface chaude de cet appareil (appareil non adapté) -Travaux par points chauds (maintenance) -Étincelles d'origine électrostatique -Particules incandescentes	Zone 0	-Appareil électrique certifier ATEX -permis de feu -mise à la terre	3	2	2	3	36	-Inertage du réservoir -Équipotentialité entre tous les éléments conducteurs à proximité du ciel de réservoir -mise à la terre -mettre en place des détecteurs de température et de pression -mettre en place des détecteurs pour surveiller la concentration air/combustible -Procédure d'autorisation de travail pour les opérations de maintenance (permis de feu) -Vérifier l'adéquation des appareils électriques et non électriques à la directive ATEX	

Chapitre 04 : Mise en place des barrières de sécurité

									-utiliser des appareils de catégorie I (pour assurer un très haut niveau de protection)
Évent de respiration	-Foudre -Étincelles d'origine électrostatique -Étincelles générées par des travaux par points chauds (maintenance)	Zone 0, sphère de rayon 2m centrée sur l'évent	-par à foudre -Appareil électrique certifier ATEX -Procédure d'autorisation de travail pour les opérations de maintenance (permis de feu)	3	2	2	2	24	-Vérifier l'adéquation des appareils électriques et non électriques à la directive ATEX -Installation d'un arrête-flamme à l'extrémité de l'évent de respiration
Cuvette de rétention	-Étincelles d'origine électrostatique -Étincelles électriques provenant d'un appareil installé dans la cuvette (pompe, détecteur de présence de liquide...) ou surface chaude de cet appareil (appareil non adapté) -Particules incandescentes	Zone 2	-Adéquation des appareils électriques et non électriques à la zone Atex -Procédure d'autorisation de travail pour les opérations de maintenance (dont permis de feu) -Mise à la terre	1	2	2	2	12	-Vérifier l'adéquation des appareils électriques et non électriques à la directive ATEX -Équipotentialité entre tous les éléments conducteurs

Chapitre 04 : Mise en place des barrières de sécurité

	-Étincelles générées par des travaux par points chauds (maintenance)								
Pompe	-Étincelles électriques (appareil non adapté) -Particules incandescentes -Étincelles générées par des travaux par points chauds (maintenance) -Étincelle d'origine électrostatique.	Zone 2	-Adéquation des appareils électriques et non électriques à la zone ATEX -Mise à la terre -permis de feu	1	2	2	2	12	-Vérifier l'adéquation des appareils électriques et non électriques à la directive ATEX -Équipotentialité entre tous les éléments conducteurs
L'entrée de citerne/ la sortie du bras de chargement	-Étincelle d'origine électrostatique -Particules incandescentes -Étincelles électriques (appareil non adapté) -Point chaud (moteur, échappement ...etc)	Zone 0	-L'inspection des camions -Mise à la terre -vêtements appropriés	3	2	3	3	54	-Vérifier l'adéquation des appareils électriques et non électriques à la directive ATEX -Il faut respecter les consignes de sécurité au cours de chargement des camion-citerne - L'inspection des camions est nécessaire pour empêcher l'inflammation de l'ATEX
Autour des îlots de chargement	-Étincelle d'origine électrostatique -Particules incandescentes -Étincelles électriques (appareil non adapté) -Point chaud (moteur, échappement ...etc)	Zone 1	-L'inspection des camions -Mise à la terre -vêtements appropriés	2	2	3	3	36	-Ventilation adéquat - Vérifier l'adéquation des appareils électriques et non électriques à la directive ATEX - Il faut respecter les consignes de sécurité au cours de chargement des camions

Conclusion générale

La Sécurité fonctionnelle consiste à identifier les défaillances spécifiques dangereuses qui conduisent à des conséquences graves « catastrophe humaine et matérielle », Les appareils dont l'échec contribue à chacun de ces risques est identifié et habituellement dénommé « relatif à la sécurité ». Des exemples sont les systèmes industriels thermo-hydrauliques, de contrôle de processus, les systèmes de l'arrêt de processus, de l'équipement de signalisation ferroviaire, les contrôles l'automobile, médicale, ...etc. matériel de traitement. En d'autres termes, tout équipement « avec ou sans logiciel » dont la défaillance peut contribuer à un risque est susceptible d'être liés à la sécurité.

La gestion d'une crise résultante d'un accident industriel majeur nécessite la mise en place de réflexions adaptées, une unité de comportement et une capacité de réaction rapide et efficace. Or, les conditions de la crise ne permettant pas toujours la mise en place de ce dispositif pendant le temps même de la crise, un travail d'anticipation est nécessaire. Ce travail est généralement effectué sous la forme des plans de secours industriels qui sont mis en place par l'exploitant et les autorités publiques afin de gérer les crises provoquées par les accidents industriels majeurs et garantie de sécurité.

L'objectif de ce mémoire était d'élaborer une étude sur les propriétés d'inflammabilités et leurs impacts dans l'industrie et l'environnement.

Afin de réaliser ce travail nous avons commencé par faire une analyse approfondie des propriétés d'inflammabilités et les caractéristiques des mélanges explosifs et dangereux. Ensuite une présentation du groupe Naftal et les composantes des bacs de stockage à son niveau pour de mieux comprendre les processus de stockage ce qui nous a permis d'élaborer notre analyse par la suite. Dans le deuxième volet de notre travail nous avons effectué une analyse des risques d'explosion par la méthode Arbre de Défaillance ADD et un diagramme Ishikawa afin de clarifie les causes et les conséquences des explosions. Puis une modélisation des conséquences engendrées par des scénarios pouvant touchés le bac de stockage des produits inflammables. Ce qui confirme l'impact de ces scénarios sur l'ensemble des bâtiments présents sur le site et mener ainsi à des blessures sévères ou même à la perte de plusieurs vies humaines.

Annexes

Annexe 1 : caractéristiques d'explosivité des principaux gaz et vapeurs inflammables

Produit Formule	Limite d'inflammabilité/ d'explosivité (% vol.)		Pt d'auto- Inflammation (°C)	Pt de fusion (°C)	Pt d'ébullition (°C)	Pt éclair (°C)	Tension de vapeur (Bar)	Densité	
	Inf.	Sup.						Liquide/ eau	Gaz/air
Acétates de butyle	1,7	7,6	421	- 76,8	124 126	23	60 °C : 0,1 100 °C : 0,5	0,88	4
Acétate de butylglycol	0,88 1,7	8,54	280 385	- 63,5	187 192	74 88	100 °C : 0,04 140 °C : 0,15 0,20	0,94	5,5
Acétate de méthylglycol	1,5	8,2	380 393	- 65	144,5	45 52	100 °C : 0,2	1	4
Acétate d'éthyle	2	11,5	427 482	- 83	77	- 7,2 - 4,4	50 °C : 0,3	0,9	3,04
Acétate d'isopropyle	1,8	8	460	- 73	88,4	4,4 7	50 °C : 0,25	0,87	3,5
Acétate de méthyle	3,1	16	502 506	- 98,1	56,9 57,1	- 13 - 5,6	40 °C : 0,5	0,93	2,8
Acétone	2,15 2,6	13 13,4	427 538	- 94,6	56,1 72	- 18 - 7,8	40 °C : 0,53 60 °C : 1,1 80 °C : 2,2	0,78	2
Acétronitrile	3,05 4,4	16	524	- 45,7	81,6	5,5 12,8	55 °C : 0,4	0,78	1,42
Acide acétique	5,4	16	427	16,6	118,1 118,5	40	100 °C : 0,5	1,05	2
Acide péraétique			200	- 25	105 107	40,5 50	20 °C : 0,014	1,15	
Acide perchlorique			200	- 112	16			1,764	
Acroléine	2,8	31	220 278	- 87,7	52,7	- 26	20 °C : 0,3	0,84	1,94

Annexes

Acrylate d'éthyle	1,4	5	355	- 72	99,5	- 10	50 °C : 0,15	0,92	3,45
	1,8	15,8	399		100	9			
Acrylate de butyle	1,5	2,1	297	- 64	147	39		0,9	4,4
Acrylate de méthyle	2,8	25	390	- 75	80	- 2,8 - 7,8	20 °C : 0,086 40 °C : 0,22 60 °C : 0,48	0,95	2,95
Alcool benzylique	1,3	13	436	- 15,3	205,3	96 104,4	30 °C : 0,13 58 °C : 1,31 89 °C : 13,12	1,045	3,72
Alcool furfurylique	1,8	16,3	490	- 14,6	170 171	65 79	40 °C : 0,002 60 °C : 0,008 80 °C : 0,026	1,13	3,4
Aldéhyde acétique	4,1	57	165	- 123	20,16	- 27	30 °C : 1,45 50 °C : 2,8 100 °C : 10	0,78	1,52
		60,5	365	- 123,5	20,8	- 50			
Anhydride acétique	2,7	10,1	315	- 73	139,5	49,4	100 °C : 0,3	1,08	3,52
			392	196	140	64,5			
Benzène	1,2	8	538 580	5,5	80,1	- 11	20 °C : 0,1 50 °C : 0,4	0,8	2,7
Butanol	1,4	11,25	340 365	- 90	117,7	35 40	70 °C : 0,15	0,81	2,56
Butyglycol	1,1	10,6	230 244	- 75	169 171,2	60	140 °C : 0,4	0,9	4,1
Cyclohexane	1,3	8,4	245	6,5	80,7	- 20	20 °C : 0,1 40 °C : 0,24	0,78	2,9
			260						
Cyclohexanone	1,3	9,4	430	- 40	153 156	43 54	62,6 °C : 0,039	0,95	3,4
Diacétone- alcool	1,8	6,9	603	- 42,8	167,9	58	20 °C : 0,001 72 °C : 0,026 96 °C : 0,07	0,93	4
Dichloropropane	3,4	14,5	555	- 100	96,2	15 21	39,4 °C : 0,13 76 °C : 0,52	1,157	3,9
Diéthylamine	1,8	10,1	312	- 49,8	55,5	- 31 - 15	6 °C : 0,13 20 °C : 0,25 38 °C : 0,52	0,7	2,5
Diéthylène glycol	1,7	10,6	229	- 9	245	124	148 °C : 0,02	1,4	3,66
			390	- 8		140			
Diméthylamine	2,8	14,4	400	- 92	7	- 55	20 °C : 2	0,67	2,37
Diméthylsulfoxyde	2,6	28,5	301	18,45	189	87	100 °C : 0,045	1,1	2,7

Annexes

(DMSO)						95			
Dioxane	1,9	22,5	180 375	11,8	101,3	11	20 °C : 0,039 45 °C : 0,13	1	3
Essence C	1	6,5	230 260		30 70	- 43	40 °C : 0,3	0,7	
Essences A et G	1	6,5	246		35 75	< 0	40 °C : 0,7	0,66	
Essences E et F	0,6 0,9	6,8 8	230 260		100 140	< 4	40 °C : 0,1	0,76	
Essence B	1	6,5	247			< 0	38 °C : 0,31		
Essence H	1	6,5	230 260			< 0	38 °C : 0,7		
Essence de térébenthine	0,8	6	220 253	- 60 - 50	150 180	32-46	130 °C : 0,5	0,86	4,84
Ethanol	3,3	19	363 425	- 114	78,5	12,8 16	20 °C : 0,057 34,9: 0,13 63,5 °C : 0,52	0,78	1,59
Ether	1,7 1,9	36 48	160 180	- 116	34,6	- 45	30 °C : 0,85 50 °C : 1,7 70 °C : 4	0,71	2,56
Ethylène diamine	3	18	405	10	116,5	38		0,89	1,45
Ethylmercaptan	2,8	18	300	- 148	35 36	- 53,7	20 °C : 0,48	0,839	2,1
Furfural	2,1	19,3	316	- 36,5	161,7	60	100 °C : 0,13 140 °C : 0,52	1,16	3,3
Glycérine			393	18	290	204	50 °C : 0,01 mbar	1,26	1,47
Hydrazine	47	100	270	- 24	104	38 72	56 °C : 0,09	1,03	1,1
Isobutanol	1,2	10,9	427	- 108	108	27,8 37,8	60 °C : 0,13 80 °C : 0,5	0,8	2,5
Isophorone	0,8	3,8	462	- 8,1	215,2	84 96	98,8 °C : 0,02	0,9	4,7
Isopropanol	2	12	400 456	- 88,5	82,4	12 18	20 °C : 0,04 40 °C : 0,14 50 °C : 0,23	0,785	2,1
Isopropylamine	2	10,4	402	- 95 - 101	32,4	- 37 - 26	10 °C : 0,4 20 °C : 0,62 40 °C : 1,35	0,68	2,03
Kérosène	0,5 1	5 7	220 230		150 270	38 40		0,8	5

Annexes

Méthacrylate de butyle	2	8	496	- 25	163	51		0,9	4,5
Méthacrylate d'éthyle	1,8	saturati on	329	- 60	119	18		0,9	3,5
Méthacrylate de méthyle	2,1	12,5	421	- 48	101	2	20 °C : 0,038 40 °C : 0,1 60 °C : 0,24	0,93	3,45
Méthanol	6,7	36,5	464	- 97,8	64,5	12 16	0 °C : 0,03 20 °C : 0,12 40 °C : 0,34	0,79	1,1
Méthyléthylcétone	1,8	11,5	516	- 85,9	79,6	- 9 - 4	25 °C : 0,13 41,6 °C : 0,26 60 °C : 0,52	0,8	2,5
Méthylisobutylcétone	1,2 1,4	7,5 8	460	- 84	116	14	20 °C : 0,02 53 °C : 0,05	0,802	3,45
Monochlorobenzène	1,3	7,1	638	- 45,2	132	28 29	20 °C : 0,01 50 °C : 0,05 100 °C : 0,38	1,1	3,5
Monoéthanolamine	5,5	17	780	10,3	170,5	85 93	80 °C : 0,02	1,02	2,1
Nitrobenzène	1,8	40	481 482,2	5,7	211	88	84,9 °C : 0,01 139,9 °C : 0,13	1,2	4,2
Oxyde d'éthylène	3	100	429 560	- 113	10,4	- 57	0 °C : 0,65 20 °C : 1,44 40 °C : 2,84	0,9	1,49
Phénylhydrazine			174 195	19,5	243,5	89	173 °C : 0,13	1,1	3,73
Pyridine	1,8	12,5	482	- 42	115,3	20	100 °C : 0,5	0,98	2,73
Sulfure de carbone	1,25	50	100	- 116 - 110	46,3	- 30	0 °C : 0,16 20 °C : 0,39 25 °C : 0,47	1,26	2,63
Toluène	1,2	7,1	535 552	- 95	110,6	4,4	20 °C : 0,029	0,87	3,14
Triéthanolamine				21,2	360	179 190,5	270 °C : 0,2	1,13	5,14
Triéthylamine	1,2	8	230	- 115	89,5	- 15 - 6,7	20 °C : 0,07	0,73	3,5
m-xylène	1,1	7	528 530	- 47,4	139,1	25 29	76,8 °C : 0,13	0,842	3,7
o-xylène	1	6	460	- 25	144,4	27	81,3 °C : 0,13	0,88	3,7

Annexes

			464			30			
p-xylène	1,1	7	529	13,4	138,4	25	75,9 °C : 0,13	0,861	3,7
			530			27			
White spirit mélange d'hydrocarbures	0,6	6	225			30	40 °C : 0,05	0,77	
	0,8	8	280			65			

Annexe 2 : Caractéristiques d'inflammabilité des poussières

Substances	Températures d'inflammation (°C)	Concentrations miniles explosives (en mg/l)	Énergie minimum de l'étincelle électrique nécessaire pour l'inflammation (milli-joules)
<i>Poussières d'origine végétales</i>			
Amandes	440	70	240
Amidon (blé)	400	25	25
Arachides	520	85	370
Blé (vrac)	500	65	60
Cacao	510	75	100
Cellulose	480	55	80
Citron (zeste déshydraté)	490	60	45
Clous de girofle	470	60	80
Coton (bourse)	440	50	60
Dextrine	410	40	40
Fécule de maïs	360	40	30
Froment concassé	470	60	160
Froment farine	—	—	50
Liège	460	35	35
Maïs (épis moulus secs)	400	30	60
Malt	400	55	35
Riz	440	45	40
Soja	520	35	50
Sucre	350	35	30
<i>Poussières de l'industrie des plastiques</i>			
<i>Matières de base</i>			
Acétate butyrate de cellulose	370	25	30
Acétate de cellulose	410	35	40
Acétate de polyvinyle	520	—	—
Alcool allytique	500	—	—
Caoutchouc synthétique	320	30	30
Coumarone-Indène	520	—	—
Éthyl cellulose	320	25	10
Lignine	450	—	—
Méthacrylate de méthyle	440	20	15

Annexes

Paraffine chlorurée	840	—	—
Phénolique	460	30	10
Polystyrène	490	30	40
Propionate de cellulose	460	—	—
Urée	470	75	80
<i>Ingrédients</i>			
Anhydride phtalique	650	15	15
Chlorure de vinyle - Acétate de vinyle	690	—	—
Farine de bois	430	40	20
Hexaméthylène tétramine	410	15	10
Pentraérythritol	450	30	10
Phénolique	490	30	—
Polystyrène	560	15	—
Poudre de bourre de coton	470	50	25
Sodium carboxyméthylcellulose	350	—	—
Urée	450	75	—
<i>Matières plastiques</i>			
Acétane de cellulose	370	25	10
Acétate butyrate de cellulose	—	—	—
Acétate de polyvinyle	—	35	120
Alcool alkylique	—	35	—
Base de résine de pin	440	55	—
Coumarone-indène	—	15	10
Laque, résine, gomme	390	15	10
Lignine	—	40	20
Phénolique	—	25	10
Polyéthylène	410	20	30
Propionate de cellulose	—	25	45
Polystyrène	—	15	15
Urée	—	70	80
Vinylbutyral	390	20	10
<i>Poussières métalliques</i>			
Aluminium atomisé	640	40	15
Aluminium pionné	550	35	10
Antimoine	415	420	—

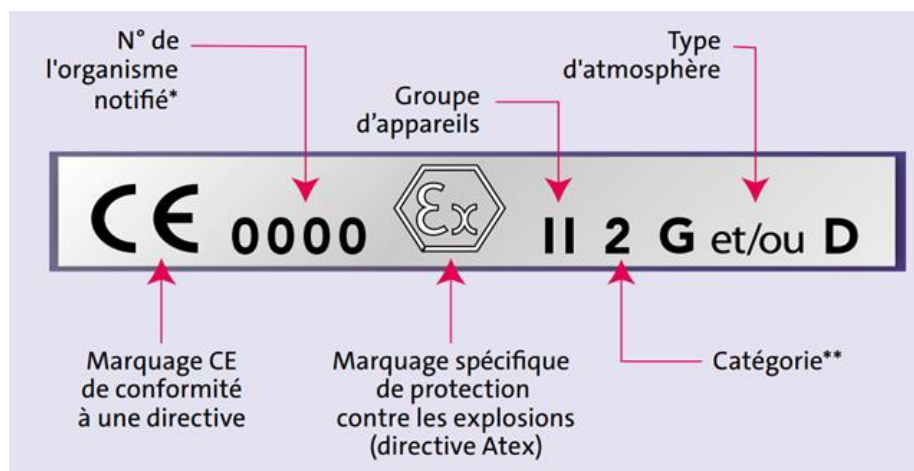
Annexes

Cadmium	570	—	—
Chrome	900	—	—
Cuivre	700	—	—
Dow métal	430	20	80
Étain	630	190	160
Fer réduit à l'hydrogène	315	120	80
Fer réduit au carbone	425	250	320
Fer carbonyle	320	105	20
Ferro sillicium (88 % Si)	860	425	—
Ferro titanium	370	140	—
Hydruure de thorium	260	80	3
Hydruure de titane	440	70	60
Hydruure d'uranium	20 (3)	60	5
Hydruure de zirconium	350	85	60
Magnésium-aluminium (50-51)	535	50	80
Magnésium atomisé	600	10	120
Magnésium moulu	540	20	40
Magnésium pionné	520	20	20
Manganèse	450	125	80
Plomb atomisé	710	—	—
Plomb pionné	580	—	—
Silicium	775	100	80
Thorium	270	75	5
Titane	330	45	10
Uranium	20 (3)	60	45
Vanadium	500	220	60
Zinc	600	480	650
Zirconium	20 (3)	40	5
<i>Poussières diverses</i>			
Caoutchouc brut	350	25	50
Charbon bitumeux	610	50	50
Dinitro-ortho-crésol	440	25	—
Gilsonite	560	20	25
Lait en poudre	490	50	50
Napaim	450	20	40
Oxybenzaldéhyde	380	20	15
Phénothiazine	540	15	—

Annexes

Protéine du foie	520	45	45
Savon	430	45	60
Soufre	190	35	15
Stéarate d'aluminium	400	15	15
Tyroïde desséchée	600	60	60

Annexe 3: Adéquation et marquage des appareils ATEX



Marquage réglementaire d'un appareil ATEX

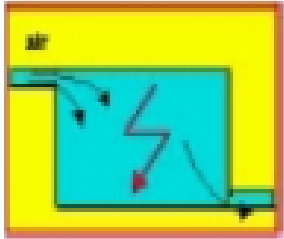

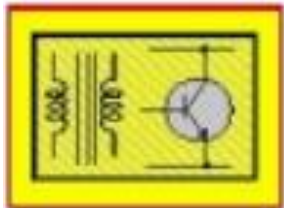
Adéquation et marquage des appareils ATEX


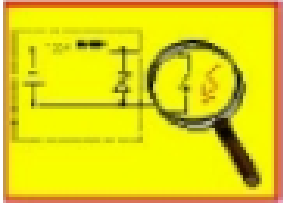

Risque	Groupe*	Adéquation zone / Appareil marqué	Marquage
Permanent	II	Zone 0 / Catégorie 1	CE II 1 G
Occasionnel	II	Zone 1 / Catégorie 2 (ou 1)	CE II 2 G (ou 1 G)
Potentiel	II	Zone 2 / Catégorie 3 (ou 2 ou 1)	CE II 3 G (ou 2 G ou 1 G)


*groupe II = industries de surface – groupe I = mines et industries extractives

Annexe 4 : Mode de protection des appareils électriques et non électrique

Mode de protection des appareils électriques

	Mode de protection	Principe	Symbol
Suppression de L'atmosphère explosive	Suppression interne 	La pénétration d'une atmosphère environnante à l'intérieur de l'enveloppe du matériel électrique est empêchée par le maintien, à l'intérieur de ladite enveloppe, d'un gaz de protection à une pression supérieure à celle de l'atmosphère environnante.	p
	Immersion dans l'huile 	Le matériel électrique est immergé dans l'huile de telle sorte qu'une atmosphère explosive se trouvant au-dessus du niveau de l'huile ou à l'extérieur de l'enveloppe ne puisse pénétrer et donc s'enflammer.	o
	Encapsulage 	Les pièces qui pourraient enflammer une atmosphère explosive par des étincelles ou par des échauffements sont enfermées dans une résine de telle manière que cette atmosphère explosive ne puisse pénétrer et donc s'enflammer.	m

<p>Suppression de la source d'inflammation</p>	<p>Sécurité augmenté</p> 	<p>Mode protection consistant à appliquer des mesures afin d'éviter, avec un coefficient de sécurité élevée, la possibilité de températures excessives et l'apparition d'arcs ou d'étincelles à l'intérieur et sur les parties externes du matériel électrique qui n'en produit pas en service normal.</p>	<p>e</p>
	<p>Sécurité intrinsèque</p> 	<p>Un circuit de sécurité intrinsèque est un circuit dans lequel aucune étincelle ni aucun effet thermique, produit dans les conditions d'épreuve prescrites par la norme, n'est capable de provoquer l'inflammation d'une atmosphère explosive.</p>	<p>i</p>
<p>Non propagation de l'inflammation</p>	<p>Enveloppe antidéflagrante</p> 	<p>Les matériels, qui peuvent enflammer une ATEX, sont enfermés dans une enveloppe non étanche qui résiste à la pression développée lors d'une explosion interne d'un mélange explosif et qui empêche la transmission de l'explosion à l'atmosphère environnante de l'enveloppe.</p>	<p>d</p>
		<p>Les parties susceptibles d'enflammer une atmosphère explosive sont en position fixe et sont complètement noyées</p>	<p>q</p>

	Remplissage pulvérulent	dans un matériau de remplissage de telle sorte que l'inflammation d'une atmosphère explosive environnante soit évitée	
			

Mode de protection des appareils non électrique

Mode de protection	Principe	Symbole
Protection par enveloppe à circulation limitée	Protection par restriction de débit. Le principe est la réduction de l'entrée de l'atmosphère explosive à l'intérieure des enveloppes (concentration <LIE). Elle peut s'appliquer à des appareils comportant des sources d'inflammation.	fr
Protection par enveloppe antidéflagrante	Ce mode de protection est identique au mode (d) pour matériel électrique	d
Protection par sécurité intégrée	Ce mode de protection a pour principe de définir les critères maximaux sur les vitesses des parties en mouvement, sur la nature des matériaux et les énergies mises en œuvre afin qu'il n'y ait pas de sources d'inflammation actives.	
Protection par sécurité à la construction	Ce mode de protection a pour principe de base de sélectionner des équipements ne contenant pas, en régime normal, de source d'inflammation.	c
Protection par contrôle de la source d'inflammation	Ce mode de protection consiste à équiper l'appareil de systèmes de contrôle et de surveillance avec capteurs mettant hors énergie l'appareil en cas de dépassement de ses	b

Annexes

	paramètres de sécurité	
Protection par surpression interne	S'inspire fortement du mode de protection (p) pour les matériels électriques.	
Protection par immersion dans un liquide	Norme qui a repris le principe du mode de protection (o) pour les matériels électriques avec des aménagements pour prendre en compte une immersion partielle et l'utilisation de liquide autres que l'huile (eau par exemple).	k

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Explosion Testing for dust, gases & vapours ». [En ligne]. Disponible sur:
https://www.explosiontesting.co.uk/ait_in_air_23.html
- [2] [3] F. Z. SERRAT, « Contribution aux méthodes d'additivité de groupes pour la prédiction des propriétés d'inflammabilités des composés organiques », Université MUSTAPHA Stambouli Mascara, 2017.
- [4] « MÉCANISME SIMPLIFIÉ DE LA COMBUSTION ». IFP engineering, 2005.
- [5] *Les mélanges explosifs gaz et vapeurs*. [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-911/ed911.pdf>
- [6] *mélanges explosives poussière*. INRS. [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-911/ed911.pdf>
- [7] « NFPA 30 ».
- [8] *Liquides inflammables - scienceamusante.net*.
- [9] J. SABARD, « Étude de l'explosion de mélanges diphasiques : hydrogène et poussières », UNIVERSITÉ D'ORLÉANS, 2013. [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi0kOD-8ojxAhWPx4UKHWctC0AQFjADegQICxAE&url=https%3A%2F%2Fwww.inrsn.fr%2FEN%2FResearch%2FTheses-post-docs%2FTheses%2FDefended-thesis%2FDSR%2FDocuments%2F2013-These-Sabard.pdf&usq=AOvVaw1ArCTz4oJB13cCAmJX3MHI>
- [10] A. Van Tiggelen et J. Burger, *Oxydations et Combustions*, vol. Volume 1. Publications de l'Institut Français du Pétrole, 1968.
- [11] Glassman, *Combustion 2ème édition*. Londres.
- [12] H. Cheikhravat, « Cinétique chimique appliquée », Université d'Orléans, la France, 2009.
- [13] H. Cheikhravat, N. Chaumeix, et C. Paillard, *Flammability limits of hydrogen-air mixtures*. 2012.
- [14] « Guide INRS – ED 911 – Les mélanges explosifs, gaz et vapeurs ».
<https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20911> (consulté le juin 06, 2021).

Références

- [15] R. K. Kumar, « Flammability Limits of Hydrogen-Oxygen-Diluent Mixtures », p. p.245-262, 1985.
- [16] H. F. Coward et G. W. Jones, *Limits of flammability of gases and vapors*. Bureau of Mines, 1952.
- [17] F. E. Belles et I. L. Drell, « Survey of hydrogen combustion properties », Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1958.
- [18] M. Berman et J. C. Cumming, *Nuclear Safety*, vol. 25.
- [19] « " guide de bonnes pratiques en vue de la mise en œuvre de la directive 1999/ 92/ CE ” de l'INERIS ». INERIS.