



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

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département Sécurité industrielle et environnement**

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Hygiène et Sécurité Industrielle

**Spécialité :** Sécurité Industrielle et Environnement

### Thème

# Modélisation 3D de la dispersion du nuage de gaz par CFD

Présenté et soutenu publiquement par :

**DAHMANI Ismail**

et

**BRAHMI El Mehdi**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme AISSANI Nassima	MCA	IMSI	Président
Mr. GUETARNI Islam Hadj Mohamed	MCB	IMSI	Encadreur
Mme SERAT Fatima Zohra	MCB	IMSI	Examineur

Année 2020/2021

## **Remerciement**

*Alhamdulillah, c'est par la grâce d'Allah le tout puissant et miséricordieux que ce travail est achevé.*

*Nous tenons à présenter nos sincères remerciements et notre Profonde reconnaissance à notre aimable*

*encadreur Dr. GUETARNI Islam Hadj Mohamed pour son encadrement, pour sa contribution, sa*

*patience et son aide tout au long de ce travail.*

*Nous adressons également nos remerciements aux enseignants qui nous ont fait l'honneur de participer,*

*aux jurys de ce mémoire.*

*Enfin nous remercions toute personne ayant de près ou de loin contribué à l'élaboration de ce modeste travail et l'ensemble des enseignants qui ont assuré notre formation durant toutes ces années d'étude.*

**Dédicace**

*À mes parents,*

*À mes frères,*

*À mes amies,*

*À tous les êtres chers dont leur soutien m'a été indispensable et qui attendent avec  
impatience ma réussite,*

**DAHMANI Ismail**

**Dédicace**

*À mes parents,*

*À mes frères,*

*À mes amies,*

*À tous les êtres chers dont leur soutien m'a été indispensable et qui attendent avec  
impatience ma réussite,*

**BRAHMI El Mehdi**

## **Modélisation 3D de la dispersion du nuage de gaz par CFD**

### **Résumé :**

Au niveau des complexes pétrolier les scénarios catastrophiques sont considérées comme un risque majeur qui menace l'industrie. Parmi ces scénarios catastrophiques on cite la dispersion du nuage de gaz. La libération accidentelle de gaz toxique et/ou inflammable constitue un scénario d'accident majeur pouvant conduire à des distances d'effets importantes, à cet effet il est nécessaire de mettre en œuvre de mesures importantes en matière de prévention des accidents et de protection des personnes, environnement et installations. Par ce présent mémoire une étude bibliographique a été muni sur les scénarios catastrophiques d'une manière générale et sur la dispersion de nuage de gaz par les modèle CFD d'une manière particulière, par la suite une zone de stockage de GPL sur sphère a été choisi pour l'élaboration de notre étude pratique. Une étude HAZOP est établi pour déterminer les scénarios catastrophiques au niveau de la zone de stockage de GPL, suite au résultats HAZOP la perte de confinement suite a une fuite comme étant évènement le plus critique a fait l'objet d'une étude plus approfondie par simulation par logiciel Phast ou la perte de confinement a était simuler selon plusieurs brèches de fuite et différents conditions météorologiques pour voir la dispersion à travers la distance la concentration et la hauteur. A la fin de notre étude nous avons modéliser la dispersion atmosphérique de ces nuages par le logiciel In:Flux pour des résultats en 3D plus précises permettant de voir en mieux la dispersion du nuage de gaz .

**Mots clés :** HAZOP, LPG, simulation et modélisation de la dispersion du nuage de gaz, CFD

### **3D modeling of gas cloud dispersion by CFD**

#### **Abstract :**

In oil & gas complexes, catastrophic scenarios are considered to be a major risk that menace the industry. Among these catastrophic scenarios is the gas cloud dispersion. The accidental release of toxic and / or flammable gas constitutes a major accident scenario that can take in to significant effect distances, for this purpose It is necessary to implement important measures in terms of accident prevention and protection of people, the environment and installations. By this present master thesis a bibliographical study has been provided on catastrophic scenarios and on gas cloud dispersion by CFD models, subsequently an LPG storage was chosen for the development of our practical study. A HAZOP study is established to determine the catastrophic scenarios at the level of the LPG storage area, following the HAZOP results the loss of containment following a leak as being the most critical event was the subject of a more in-depth study by Phast software simulation, where the loss of containment was simulated according to several leakage breaches and different meteorological conditions to obtain results the dispersion through distance, concentration and height. At the end of our study, we modeled the atmospheric dispersion of these clouds using the In: Flux software for more precision with 3D results allowing a better view of the dispersion of the gas cloud.

**Key words:** HAZOP, GPL, Simulation and modeling of gas cloud dispersion, CFD

## Liste des abréviations

3D : Tridimensionnel

ADD : Arbre de Défaillance

ALARP : As Low As Reasonably Practicable

AMDE : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et leurs Criticité

APR : Analyse Préliminaire des Risques

ATEX : Atmosphère Explosive

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

CEI : Commission électrotechnique internationale

CFD : Computational Fluid Dynamics

GNL : Gaz Naturel Liquéfié

GPL : Gaz Pétrolier Liquéfié

HAZOP : HAZard and OPerability study

ISO : International Organization for Standardization

LIE : Limite inférieure d'explosivité

LSE : Limite supérieure d'explosivité

PHA : Process Hazard Analysis

PHAST : Process Hazard Analysis Software Tool

PPI : Plan Particulier d'Intervention

UVCE : Unconfined Vapor Cloud Explosion (explosion non confinée de gaz ou de vapeurs)

## Table des matières

Remerciement.....	i
Dédicace .....	ii
Dédicace .....	ii
Résumé : .....	iii
Abstract : .....	iii
Liste des abréviations.....	iv
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux .....	vii
Introduction générale : .....	1
<b>Chapitre I: Généralité sur les phénomènes dangereux</b>	
I.1. Introduction : .....	3
I.2. Définitions et concepts : .....	4
I.2.1. Notion de risque et danger : .....	4
I.2.2. Notion de prévention et intervention : .....	6
I.2.3. Notion de sécurité : .....	7
I.3. Contexte règlementaire et principaux textes de référence : .....	9
I.3.1. Règlementation Européenne : .....	9
I.3.1.1. Exigences de la réglementation ATEX : .....	9
I.3.1.2. Exigence règlementaire des émissions atmosphériques : .....	9
I.3.2. Règlementation Algérienne : .....	9
I.4. Les scénarios catastrophiques et les phénomènes et leurs effets thermiques associés : ....	10
I.4.1. Incendie : .....	10
I.4.1.1. Description du phénomène : .....	10
I.4.1.2. Le triangle de feu : .....	11
I.4.1.3. Flamme : .....	11
I.4.1.4. Modélisation des effets thermiques : .....	12
I.4.2. Explosion de type UVCE : .....	12
I.4.2.1. Description du phénomène : .....	12
I.4.3. Explosion de type BLEVE : .....	13
I.4.3.1. Description du phénomène.....	13
I.4.3.2. Les causes du BLEVE : .....	13
I.4.3.3. Les conséquences dévastatrices d'un BLEVE : .....	14
I.4.4. Nuage toxique : .....	15

I.4.4.1. Déplacement du nuage :.....	15
Autres termes :.....	16
I.5. Méthodologie d'identification des scénarios d'accidents :.....	18
I.5.1. Termes sources .....	19
I.5.1.1. Les rejets continus :.....	19
I.5.1.2. Les rejets instantanés.....	21
I.6. Reconstitution d'accident.....	21
I.6.1. Catastrophe de Feyzin :.....	21
I.6.2. San Ixuatepec, Mexique 1984 :.....	22
I.6.3. Explosion dans un complexe de GNL – Skikda – Algérie :.....	23
I.7. Méthodes d'analyse des risques :.....	24
I.7.1. Introduction :.....	24
I.7.2. Domaines d'application :.....	24
I.7.3. APR (Analyse Préliminaire des Risques) :.....	25
I.7.4. Arbre des défaillances :.....	27
I.7.5. Arbre d'évènement :.....	27
I.7.6. AMDE et AMDEC :.....	29
I.7.7. HAZOP (HAZard and OPerability study):.....	30
I.8. Conclusion :.....	33

## **Chapitre II: Modélisation CFD de la dispersion atmosphérique des gaz**

II.1. Introduction :.....	31
II.2. Modèle tridimensionnels de dispersion atmosphérique :.....	32
II.2.1. Généralités.....	32
II.2.2. Avantages et inconvénients :.....	33
II.2.3. Synthèse :.....	33
II.3. Objectifs et principes de la modélisation de la dispersion atmosphérique :.....	34
II.3.1. Objectifs.....	34
II.3.2. Les principaux mécanismes de la dispersion atmosphérique :.....	34
II.3.2.1. Le transport :.....	35
II.3.2.2. La diffusion :.....	35
II.3.2.3. L'équation fondamentale générale de la diffusion-dispersion :.....	35
II.3.3. Modélisation de la dispersion d'un gaz :.....	36
II.3.4. Conditions météorologiques :.....	37
II.3.4.1. Structure de l'atmosphère :.....	37
II.3.4.2. Le profil vertical de la vitesse du vent :.....	38

II.3.4.3. Les précipitations :	38
II.3.4.4. L'humidité :	38
II.3.4.5. La rugosité du sol :	39
II.4. Conclusion :	39

### **Chapitre III: Etude et modélisation de la dispersion du nuage de gaz**

III.1. Introduction :	40
III.2. Description de complexe GP1Z :	40
III.2.1. Situation :	40
III.2.2. Fiche technique du complexe GP1/Z :	41
III.2.3. Les différents départements du complexe GP1/Z :	43
III.2.4. Organisation de sécurité au niveau du complexe GP1/Z :	44
III.2.5. L'unité Stockage des produits finis sphères sous pression :	45
III.3. Les caractéristiques météorologiques de la région Arzew :	48
III.4. Application du HAZOP sur la sphère de stockage GPL 07-T-00XX :	51
III.4.1. L'application de la méthode HAZOP au niveau de sphère stockage de GPL :	51
III.4.2. Interprétations et résultats :	59
III.4.3. Synthèse sur les résultat HAZOP :	60
III.5. Modélisation de la dispersion par PHAST la sphère de stockage GPL 07-T-00XX :....	61
III.5.1. Résultats et discussion :	61
III.6. Modélisation du dispersion GPL par INFLUX de la sphère de stockage GPL 07-T-00XX :	69
III.6.1. Etude de dispersion du nuage gazeux « propane » :	69
III.6.2. Les paramètres du complexe GP1Z influant le comportement des rejets de gaz :	69
III.6.3. Modélisation de la dispersion :	71
III.7. Conclusion :	83
Conclusion générale :	84

### **Annexes**

Annexe 1 : Les équipement mis en place dans la zone:	86
Annexe 2 : Présentation de logiciel PHA-Pro :	89
Annexe 3 : Présentation du logiciel Insight Numerics Flux :	91
Annexe 4 : présentation de logiciel PHAST :	94

## Liste des figures

<b>Figure I. 1:</b> Diagrammes d'acceptabilité des risques (Courbe de Farmer).....	5
<b>Figure I. 2:</b> Le triangle de feu.....	11
<b>Figure I. 3:</b> Principaux phénomènes dus au rejet d'une substance dangereuse.....	18
<b>Figure I. 4:</b> Fuite sur une paroi de réservoir .....	19
<b>Figure I. 5:</b> Rupture totale d'une canalisation courte .....	20
<b>Figure I. 6:</b> Rupture sur une canalisation longue .....	20
<b>Figure I. 7:</b> Rupture catastrophique d'un réservoir .....	21
<b>Figure I. 8:</b> Exemple d'Arbre d'évènement.....	28
<b>Figure II. 1 :</b> Synthèse des principaux avantages de chaque approche .....	34
<b>Figure II. 2:</b> Représentation du processus de dispersion atmosphérique .....	35
<b>Figure III. 1:</b> Schéma représentatif Situation géographique et voisinage du complexe GP1/Z .....	41
<b>Figure III. 2:</b> L'organigramme du Complexe GP1/Z.....	43
<b>Figure III. 3:</b> les sphères de stockage d'alimentation .....	46
<b>Figure III. 4:</b> Localisation de scénario .....	48
<b>Figure III. 5:</b> Les facteurs climatologique de la région d'Arzew.....	48
<b>Figure III. 6:</b> rose des vent annuelle (2020) .....	49
<b>Figure III. 7:</b> zone de stockage de charge (P&ID).....	50
<b>Figure III. 8 :</b> Graphe nombre de conséquences en fonction de la gravité et de la probabilité .....	59
<b>Figure III. 9:</b> Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers le nord (petite fuite).....	62
<b>Figure III. 10:</b> Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers l'ouest ( petite fuite).....	62
<b>Figure III. 11:</b> Concentration de nuage de gaz vs Distance (petite fuite) .....	62
<b>Figure III. 12:</b> Hauteur de nuage de gaz par rapport le sol (petite fuite).....	62
<b>Figure III. 13:</b> Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers le nord (moyenne fuite) .	63
<b>Figure III. 14:</b> Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers l'ouest ( moyenne fuite).	63
<b>Figure III. 15:</b> Concentration de nuage de gaz vs Distance (moyenne fuite).....	63
<b>Figure III. 16:</b> Hauteur de nuage de gaz par rapport le sol (moyenne fuite).....	63
<b>Figure III. 17:</b> Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers le nord (grande fuite).....	64
<b>Figure III. 18:</b> Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers l'ouest ( grande fuite) ....	64

<b>Figure III. 19:</b> Concentration de nuage de gaz vs Distance (grande fuite).....	64
<b>Figure III. 20:</b> Hauteur de nuage de gaz par rapport le sol (grande fuite).....	64
<b>Figure III. 21:</b> Concentration de nuage de gaz vs Distance (catastrophique rupture).....	65
<b>Figure III. 22:</b> Panaches de dispersion de gaz (catastrophique rupture).....	65
<b>Figure III. 23:</b> Concentration de nuage de gaz vs le temps à une distance de 50 m (catastrophique rupture).....	65
<b>Figure III. 24:</b> Flash fire suite à une rupture.....	66
<b>Figure III. 25:</b> Flash fire suite à une petite fuite .....	66
<b>Figure III. 26:</b> Flash fire suite à une moyenne fuite.....	66
<b>Figure III. 27:</b> Flash fire suite à une grande fuite .....	66
<b>Figure III. 28:</b> Localisation de fuites - sortie de sphère 07-T-00XX.....	70
<b>Figure III. 29:</b> direction du vent vers le Sud.....	71
<b>Figure III. 30:</b> direction du vent vers l'East.....	72
<b>Figure III. 31:</b> vue sur l'emplacement d'une petite fuite.....	72
<b>Figure III. 32:</b> Dispersion de nuage de gaz due à une petite fuite vers le Sud selon les concentrations.....	73
<b>Figure III. 33:</b> vue en 3D sur la propagation du nuage de gaz due a une petite fuite vers le Sud.....	73
<b>Figure III. 34:</b> Dispersion de nuage de gaz due à une petite fuite vers l'Est selon les concentration.....	74
<b>Figure III. 35:</b> vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une petite fuite vers l'Est .....	74
<b>Figure III. 36:</b> vue sur l'emplacement d'une moyenne fuite.....	75
<b>Figure III. 37:</b> Dispersion de nuage de gaz due à une moyenne fuite vers le Sud selon les concentrations.....	75
<b>Figure III. 38:</b> vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une moyenne fuite vers le Sud.....	76
<b>Figure III. 39:</b> Dispersion de nuage de gaz due à une moyenne fuite vers l'Est selon les concentrations.....	76
<b>Figure III. 40:</b> vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une moyenne fuite vers l'Est .....	77
<b>Figure III. 41:</b> vue sur l'emplacement d'une grande fuite.....	78
<b>Figure III. 42:</b> Dispersion de nuage de gaz due à une grande fuite vers le Sud selon les concentrations.....	78

<b>Figure III. 43:</b> vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une grande fuite vers le Sud * (capture 3D).....	79
<b>Figure III. 44:</b> Dispersion de nuage de gaz due à une grande fuite vers l’Est selon les concentrations.....	79
<b>Figure III. 45:</b> vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une grande fuite vers l’Est * (capture 3D).....	80
<b>Figure III. 46:</b> vue de face de la propagation de nuage de gaz vers le Sud due au trois types de fuite.....	81
<b>Figure III. 47:</b> vue d’en haut de la propagation de nuage de gaz vers le Sud due au trois types de fuite.....	81
<b>Figure III. 48:</b> vue de face de la propagation de nuage de gaz vers l’Est due au trois types de fuite.....	82
<b>Figure III. 49:</b> vue d’en haut de la propagation de nuage de gaz vers l’Est due au trois types de fuite.....	82

## Liste des tableaux

<b>Tableau I. 1:</b> Arborescence d’un scénario d’accident.....	5
<b>Tableau I. 2:</b> Diagrammes d’acceptabilité des risques.....	6
<b>Tableau I. 3:</b> Exemple de barrière associée pour certain action.....	8
<b>Tableau I. 4:</b> Condition des rejets avec ces résultats.....	15
<b>Tableau I. 5:</b> Critères de choix pour les plus importantes méthodes d’analyse des risques ..	25
<b>Tableau I. 6:</b> Exemple de tableau de type « APR ».....	26
<b>Tableau I. 7:</b> Exemple d’un tableau de type AMDEC.....	29
<b>Tableau III. 1:</b> Caractéristique générale des sphères de produits finis.....	46
<b>Tableau III. 2:</b> Les Caractéristiques physiques et chimiques du produit utilisé (GPL).....	47
<b>Tableau III. 3:</b> Application de la méthode HAZOP au niveau de Sphère de stockage GPL 07-T-00XX.....	52
<b>Tableau III. 4:</b> Les résultats obtenue à partir des graphes.....	67
<b>Tableau III. 5:</b> les résultats obtenue à partir le rapport des scénarios.....	68

***Introduction***  
***Générale***

## **Introduction générale :**

Afin de faire face à tout besoin énergétiques nationale et internationale le GPL représente le produit le plus sollicité dans le monde, d'où la multiplication des complexes de liquéfaction du gaz pétrolier. Au niveau de ces complexes les scénarios catastrophiques sont considérés comme un risque majeur qui menace l'industrie.

D'autre part, dans le cadre de la réalisation des études de danger, les réglementations prévoient d'identifier analyser et évaluer les risques pour l'établissements des mesures et barrières de sécurité performante. La mise en œuvre de ces mesures est élaborée à titre de prévention des accidents et de protection des personnes, environnement et installations. La libération accidentelle de gaz toxique et/ou inflammable constitue un scénario d'accident majeur pouvant conduire à des distances d'effets importantes. Il en résulte la propagation de nuages dans l'atmosphère selon des phénomènes extrêmement complexes régis par de nombreuses variables.

Aujourd'hui la modélisation de la dispersion de nuage de gaz relève de plusieurs modèle et outils de simulation et l'efficacité de ces outils pour l'obtention des résultats performant permettant de mieux comprendre le scénario catastrophique afin de mettre en place le système de sécurité le plus adéquat dépend des modèles choisis d'où l'intérêt de ce travail et de proposer un modèle par CFD afin de modéliser la dispersion du nuage de gaz en 3D et mieux comprendre ça propagation a cette effet notre projet de fin d'étude se compose de 3 chapitre.

Le 1<sup>er</sup> chapitre fait l'objet d'un apport bibliographique sur les notion de base du risque le cadre réglementaire ainsi que les scenarios catastrophiques et les méthodes d'analyse des risques.

Le 2<sup>ème</sup> chapitre représente les modèle de dispersion du nuage de gaz les lois de dispersion tridimensionnelles et les outils de la modélisation 3D de la dispersion.

- ✓ Le troisième chapitre représentant la partie pratique est subdivisé sur les parties suivantes :
- Description de l'unité choisi pour notre étude.
  - Une analyse des risques par la méthode HAZOP pour la détermination des scénarios catastrophiques.
  - La simulation par logiciel Phast de la perte de confinement a était simuler selon plusieurs brèches de fuite et différents conditions météorologiques pour voir la dispersion à travers

la distance la concentration et la hauteur pour avoir un aperçu sur la propagation du nuage de gaz.

- Et A la fin de notre étude nous avons modéliser la dispersion atmosphérique de ces nuages par le logiciel In:Flux pour des résultats en 3D plus précises permettant de voir en mieux la dispersion du nuage de gaz .

Pour chaque proposition nous mettons une synthèse pour expliquer les résultats obtenu.

# ***Chapitre I :***

***Généralité sur les phénomènes dangereux***

### I.1. Introduction :

Dans l'aire du développement industriel, l'accidentologie récente rappelle constamment la nécessité de prendre en considération le risque technologique lié à l'exploitation industrielle dans le secteur pétrolier. Parmi les accidents envisageables, le phénomène d'explosion de gaz peut être particulièrement dévastateur et même en cas d'un nuage de gaz toxique. Il est donc indispensable de bien comprendre son mécanisme et d'être capable d'en évaluer les effets.

À ce titre, les accidents de Bhopal d'une fuite de gaz toxiques dans une usine agrochimique (1984) et la catastrophe écologique de SEVESO (1976), et Skikda (2004) sont particulièrement représentatifs dans la mesure où les dégâts constatés lors de ces accidents ont été beaucoup plus importants que prévus. Afin de maîtriser ces risques les experts ont élaborer plusieurs méthodes d'analyse de risque (APR, HAZOP, AMDEC...)

D'où l'intérêt de ce chapitre et de mettre en évidence les notions des risques, la réglementation national et international exiger pour faire face à l'accident industriel et la méthodologie d'indentification et d'analyse des scénarios catastrophiques.

### I.2. Définitions et concepts :

#### I.2.1. Notion de risque et danger :

**Le danger**[1] : dont la notion précède celle de risque est défini comme un potentiel de préjudice ou de nuisance aux personnes, aux biens ou à l'environnement. Ce concept abstrait couvre aussi bien des éventualités physiques ou matérielles accessibles par nos sens que des éventualités immatérielles comme l'énergie potentielle ou cinétique. De façon plus générale, un danger peut être une substance (produit toxique...), un objet (virus, astéroïde...), un phénomène (inondation, séisme...) ou un processus (erreur de diagnostic, erreur d'administration, erreur opératoire...).

**Le risque**[2] : met en jeu deux notions. L'une, qualitative, qui concerne son origine, à savoir sa genèse par l'exposition du système au danger, appelée situation dangereuse, qui, suivant les circonstances, peut se transformer en situation accidentelle avec des conséquences de différentes natures et importances. L'autre, quantitative, qui est la mesure en termes de probabilité d'occurrence et de gravité de l'incertitude de la situation dangereuse ou de la situation accidentelle, appelée aussi événement redouté.

Il en résulte que le couple probabilité-gravité est indissociable et doit être considéré comme une variable bidimensionnelle. Par là même, un risque n'est ni une probabilité, ni une gravité, mais les deux en même temps. Il s'ensuit qu'une décision associée à un risque ne peut être prise sur la base d'une seule de ses deux composantes.

**La maîtrise des risques**[3] : est associée directement aux actions de réduction et de contrôle faites sur les composantes du risque : la prévention regroupe les actions qui ont pour but de diminuer la probabilité d'occurrence du risque, tandis que la protection regroupe les actions qui ont pour but de diminuer la gravité de ses conséquences. Plus précisément, la prévention vise à réduire conjointement les probabilités d'occurrence des causes contact, amorce et circonstancielle « non programmées ». En premier, la réduction de la probabilité d'occurrence de la cause contact sera recherchée, ce qui peut aboutir à l'absence d'occurrence de situation dangereuse. En deuxième, ce sera celle de la cause amorce jusqu'à l'élimination éventuelle de l'occurrence de l'accident. En troisième, ce sera celle de la cause circonstancielle.

**La criticité du risque** : est le résultat d'une fonction de décision  $f_D$  associée à une échelle de valeurs politico-économique, etc. qui pour chaque risque évalué  $R(G, V)$  associe ou non une action de réduction ou de contrôle. Ce qui s'exprime en posant  $C = f_D(G, V)$ . L'« ensemble de définition » de  $f_D$  est l'ensemble des couples  $(G, V)$ . L'« ensemble des valeurs » de  $f_D$  correspond à l'ensemble des criticités, appelé échelle de criticité (tableau I. 1), réparti en trois classes suivant le principe ALARP (As Low As Reasonably Practicable).

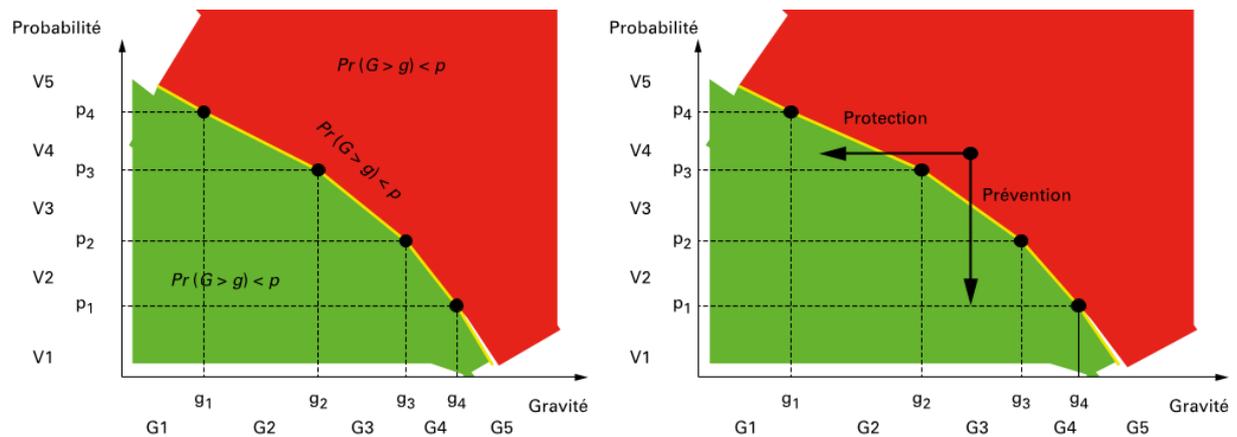
## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

**Tableau I. 1:** Arborescence d'un scénario d'accident

Classe de criticité	Intitulé de la classe	Intitulé des décisions et les actions
C1	Acceptable en l'état	Aucun action n'est à entreprendre
C2	Tolérable sous contrôle	On doit organiser un suivi en termes de gestion du risque tel que contrôle ou transfert
C3	Inacceptable	On doit refuser la situation et prendre des mesures de réduction des risques Sinon... on doit refuser toute ou partie de l'activité

Cette classification de l'ensemble des risques de l'activité en trois classes doit être validée par la gouvernance du risque qui dispose des ressources associées aux décisions rattachées à chaque classe.

Les trois classes sont visualisées par zone respectivement en vert, jaune et rouge sur le premier diagramme de la figure I. 1 appelé référentiel d'acceptabilité des risques ou diagramme ou tableau de criticité. Le second diagramme visualise les actions de maîtrise des risques.



**Figure I. 1:** Diagrammes d'acceptabilité des risques (Courbe de Farmer)

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

Exemple de diagrammes qualitatif et probabiliste sont donnés sur le tableau I. 2.

**Tableau I. 2:** Diagrammes d'acceptabilité des risques

		Gravité				
		G1	G2	G3	G4	G5
Vraisemblance	E					
	D					
	C					
	B					
	A					

Le regroupement structuré des actions de prévention et de protection est appelé plan de réduction des risques.

Les actions de contrôle permettent d'assurer la traçabilité des actions précédentes et de garantir dans le temps le maintien du niveau de risque acceptable ou tolérable atteint. Ces actions sont regroupées dans le catalogue des paramètres de sécurité.

**Le management des risques**[2] repose d'une part sur l'assignation d'objectifs de risques acceptables ou tolérables définis par le référentiel d'acceptabilité des risques et d'autre part par la mise en place de ressources ou moyens de traitement pour permettre d'atteindre les objectifs (par la réduction des risques initiaux) et d'assurer leur maintien (par le contrôle des risques résiduels).

### I.2.2. Notion de prévention et intervention :

#### I.2.2.1. Prévention :

C'est l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour préserver la santé et la sécurité des salariés, améliorer les conditions de travail et tendre au bien-être au travail, la prévention visée à minimiser la probabilité d'occurrence des dangers.

#### *Les différents types de prévention :*

- **La prévention collective** : à pour objectif de protéger tous les travailleurs en contact avec un danger potentiel de manière régulière ou occasionnelle, en supprimant ou en réduisant les situations dangereuses pour tout un atelier, chantier ... (exemples : isolation phonique des locaux, aspiration des fumées et/ou vapeurs nocives à la source, système de ventilation...).
- **La prévention individuelle** : à pour objectif de protéger uniquement l'opérateur par des équipements de protection (exemples : harnais, casque, masque respiratoire, ...)

## **Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux**

### **I.2.2.2. Protection :**

C'est l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre visés à minimiser la gravité des dommages.

### **I.2.2.3. Intervention :**

C'est l'ensemble des moyens humains et matériels destinés à limiter les dégâts d'un accident.

### **I.2.3. Notion de sécurité :**

Suivant le guide ISO/CEI 73 élaboré par l'ISO (organisation internationale de normalisation) sur la terminologie du management du risque, la sécurité est l'absence de risque inacceptable, de blessure ou d'atteinte à la santé des personnes, directement ou indirectement, résultant d'un dommage au matériel ou à l'environnement. [4]

Et selon la norme IEC 61508, dans le cadre des systèmes industriels, la sécurité consiste à mettre en œuvre des moyens évitant l'apparition de dangers. Elle s'énonce alors par l'absence de risque inacceptable.

### **I.3.1. Barrières de sécurité :**

Depuis quelques années, le terme « barrière de sécurité » tend à être remplacé par « mesures de maîtrise des risques » définit une barrière comme : « Ensemble d'éléments techniques et/ou organisationnels nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité ».

### **I.3.2. Fonction de sécurité :**

Qui est définie comme : « Fonction ayant pour but la réduction de la probabilité d'occurrence et/ou des effets et conséquences d'un événement non souhaité dans un système. Les principales actions assurées par les fonctions de sécurité en matière d'accidents majeurs dans les installations classées sont : empêcher, éviter, détecter, contrôler, limiter... ».[5]

À la lecture de ces deux définitions, il ressort qu'une barrière doit toujours être définie par rapport à une fonction de sécurité. (voir tableau I. 3)

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

*Tableau I. 3: Exemple de barrière associée pour certain action*

Action de sécurité	Exemple de fonction de sécurité	Exemple de barrière associée
Empêcher	Empêcher qu'un choc de véhicule sur une canalisation ne génère une brèche	Enfouissement d'une canalisation
Éviter	Éviter le débordement d'un bac	Fonction instrumentée de sécurité composée d'un ou plusieurs détecteurs de niveau, d'un système de traitement logique et d'un ou plusieurs dispositifs permettant d'isoler la canalisation d'emplissage
Détecter	Détecter la mise à l'atmosphère d'un gaz inflammable pour limiter la quantité de gaz relâché	Fonction instrumentée de sécurité composée par un ou plusieurs détecteurs de gaz, un système de traitement logique et un ou plusieurs dispositifs d'isolement
Contrôler	Contrôler la montée en température dans un réacteur en ajustant la quantité de réactif introduite	Fonction instrumentée de sécurité composée d'un ou plusieurs capteurs de température, d'un système de traitement logique et d'une vanne de régulation sur la canalisation d'alimentation en réactif
Limiter	Limiter la montée en pression dans un réservoir	Soupape de sécurité

### **I.3. Contexte réglementaire et principaux textes de référence :**

#### **I.3.1. Réglementation Européenne :**

##### **I.3.1.1. Exigences de la réglementation ATEX :**

Directive 1999/92/CE du Parlement européen et du Conseil, du 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 aux risques d'atmosphères explosives (ATEX). Il s'agit d'une directive particulière au sens de l'article 16 de la directive 89/391/CEE. Cette dernière, dite directive cadre, concerne la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs. Elle est le complément social de la directive 1994/9/CE concernant le rapprochement des législations des États membres pour les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible.

##### **I.3.1.2. Exigence réglementaire des émissions atmosphériques :**

La principale directive concernant le domaine de l'air au niveau de la prévention et de la réduction des émissions atmosphériques et de la surveillance de la qualité de l'air est la directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 est celle qui régit les émissions des polluants que nous connaissons les mieux, à savoir les particules fines et le dioxyde d'azote. Elle s'appelle la directive pour la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe.

#### **I.3.2. Réglementation Algérienne :**

- Décret exécutif n° 06-198 -2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement
- Décret exécutif n° 07-144 du 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.
- Loi 04-20 sur la prévention des risques majeurs.
- Décret exécutif n° 15-09 du 2015 fixant les modalités d'approbation des Etudes de dangers spécifiques au secteur des hydrocarbures et leur contenu.
- Loi n°83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement

La directive européenne 94/9/CE (ATEX 95) pour les équipements destinés à être utilisés en zones ATEX.

### **I.4. Les scénarios catastrophiques et les phénomènes et leurs effets thermiques associés :**

#### **I.4.1. Incendie : [15]**

Le risque d'incendie est omniprésent dans les installations industrielles : la majorité des installations soumises à autorisation et/ou à la directive SEVESO 3, aussi que les installations de stockage de produits organiques susceptibles d'engendrer des atmosphères explosives (tels les silos, l'une des priorités nationales depuis l'explosion de Blaye en 1997), de nombreux établissements chimiques, de petits dépôts pétroliers, etc.

On conçoit donc que ce phénomène implique principalement la surface de la nappe en contact avec l'air : les dimensions et la géométrie de la nappe peuvent être tout à fait variables. On distinguera alors :

- **Les feux de cuvette de rétention** : l'extension de la nappe est limitée par une cuvette de rétention dont le dimensionnement est imposé, notamment, par les exigences réglementaires applicables au stockage ;
- **Les feux de réservoir** : le feu se développe à l'intérieur d'une enceinte, la surface de l'incendie est déterminée par les dimensions du réservoir ;
- **Les feux dits de flaque libre** où l'absence de moyens physiques ne limite pas la propagation de la nappe. L'extension de la nappe est alors principalement fonction des caractéristiques du terrain, des conditions météorologiques et, bien entendu, des conditions de rejet du combustible.

##### **I.4.1.1. Description du phénomène :**

Le phénomène de combustion d'un produit ne s'applique pas au liquide lui-même, mais implique les vapeurs émises par le produit, réchauffé ou non. Aussi, pour qu'un produit brûle, il faut qu'il émette des vapeurs inflammables. Pour les combustibles liquides, les vapeurs inflammables sont émises par évaporation de la phase liquide. Pour les combustibles solides, un processus plus complexe mettant en jeu, notamment, des réactions de décomposition, fusion ou pyrolyse est indispensable à l'émission de gaz ou de distillats inflammables.

Ainsi, la combustion se fait en phase gazeuse, là où se développent les flammes. L'exothermicité de la réaction de combustion libère de l'énergie dont une partie est cédée au

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

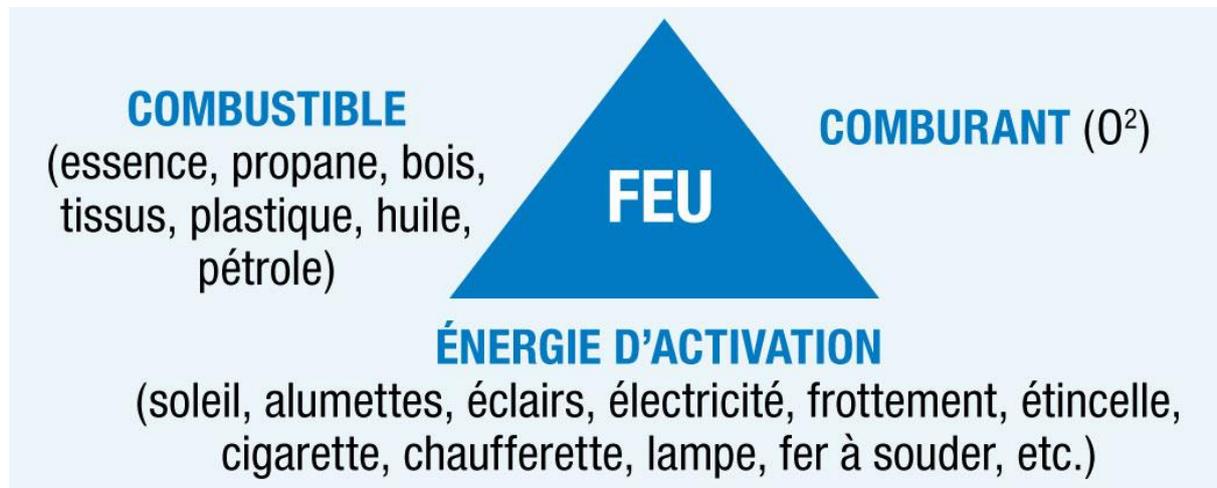
combustible, entretenant ainsi l'émission de gaz inflammables. Le feu de nappe est donc un phénomène de combustion autoentretenue.

Fondamentalement, la combustion est une réaction d'oxydo-réduction exothermique entre un comburant et un combustible, déclenchée par une énergie d'activation :

- ✓ Le comburant, oxygène de l'air dans le cas présent, joue le rôle de l'oxydant ;
- ✓ Le combustible, l'hydrocarbure répandu, joue le rôle du réducteur.

### I.4.1.2. Le triangle de feu :

La combustion c'est une réaction chimique d'oxydoréduction exothermique, il ne peut pas se produire que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant et une source d'énergie en proportion suffisante, On représente de façon symbolique cette association par le triangle du feu.



*Figure I. 2: Le triangle de feu. [Source : <https://cutt.us/lw6B1>]*

### I.4.1.3. Flamme :

La flamme d'un incendie[6] se définit comme la zone où a lieu la combustion proprement dite, en phase gazeuse. Elle peut ainsi être assimilée à un volume de gaz, de combustible non brûlé et de suies résultant de la combustion incomplète du combustible, et correspond sensiblement à la partie lumineuse de la zone de combustion. Elle est composée essentiellement de trois parties :

- Au-dessus de la flaque, la flamme comprend une zone dite persistante, dont la géométrie est quasi constante dans le temps et dans l'espace. Dans cette zone, les températures sont particulièrement élevées : le pouvoir émissif y est donc important ;

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

- Au-dessus de cette zone, une autre zone, toujours dans la partie lumineuse, que l'on qualifie d'intermittente. La position et la géométrie de la flamme varient fortement au cours du temps. Les températures y sont sensiblement plus basses ;
- Enfin, en partie haute, la zone des fumées formées par les produits issus de la combustion, dont éventuellement des produits toxiques de décomposition.

Sans entrer dans le détail, mentionnons que les flammes peuvent aussi être caractérisées par la façon dont se mélangent combustible et comburant, ainsi que par le régime des écoulements gazeux. On distingue alors quatre familles, à savoir la diffusion en régime laminaire ou turbulent, et les prémélanges en régime laminaire ou turbulent.

### I.4.1.4. Modélisation des effets thermiques :

Il existe de nombreuses méthodes de calcul, de mise en œuvre simple, permettant d'estimer les effets thermiques radiatifs associés à un feu de nappe. Bien entendu, il existe des modèles beaucoup plus complexes décrivant plus finement le comportement d'une flamme. Leur utilisation peut toutefois s'avérer coûteuse, si bien que leur usage est souvent réservé à des cas particuliers, comme les incendies de stockages de gaz liquéfié.

### I.4.2. Explosion de type UVCE :

Une explosion est :

- Soit un éclatement, cas assez fréquent dû à la pression anormalement élevée dans un appareil par suite d'un mauvais fonctionnement de l'installation, à l'apport de chaleur par un petit incendie extérieur ou à l'explosion d'un récipient mal dégazé ;
- Soit l'explosion d'un nuage de gaz ou de vapeurs, formé à la suite d'une rupture et plus ou moins intimement lié à l'air : ce nuage est très souvent « allumé » dans l'installation même où s'est produite la fuite ou à proximité immédiate de l'installation.

#### I.4.2.1. Description du phénomène :

Les explosions accidentelles de gaz à l'air libre (ou UVCE) comprennent généralement la succession d'étapes suivantes :

- La fuite d'un GPL provenant de la sphère de stockage sur une aire de dépotage, avec rejet dans l'atmosphère d'un produit combustible, conduit à son tour à un rejet diffus de gaz ;
- Cette mise accidentelle à l'atmosphère conduit à un mélange avec l'oxygène de l'air formant ainsi un volume inflammable. Dans le même temps, on observe la dispersion et la convection du nuage de gaz (dérive), dont une fraction reste inflammable, c'est-à-dire une atmosphère

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

où la limite inférieure d'explosivité LIE est atteinte. La formation d'un nuage explosible dérivant reste toujours possible mais, dans la majorité des cas, les explosions se produisent à proximité du lieu de formation, donc sans dérive ou avec une dérive très faible ;

- La présence accidentelle d'une source d'ignition va causer une inflammation du nuage de gaz puis une explosion de type UVCE (explosion non confinée de gaz ou de vapeurs) ;
- Enfin, on observe la propagation du front de flamme à travers la partie inflammable du nuage, créant une onde de pression aérienne, si sa vitesse de propagation est suffisante.

On notera que la propagation des flammes s'accompagne d'une expansion des gaz brûlés qui passent alors par des températures de plusieurs centaines de degrés Celsius, et peuvent atteindre 2 000 °C [7].

### I.4.3. Explosion de type BLEVE :

Le terme BLEVE est l'acronyme de l'anglais Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. La définition d'un BLEVE est la vaporisation instantanée et totale d'un liquide surchauffé sous pression lorsque la capacité le contenant est brutalement dépressurisée à la pression atmosphérique[8].

#### I.4.3.1. Description du phénomène

Les BLEVE sont causés par la rupture totale du réservoir. Une rupture totale peut se produire de trois façons :

- Via une fissuration spontanée due à une fragilisation du réservoir ;
- Suite à une vaporisation explosive déclenchée par la chute de pression d'un liquide à une température proche ou supérieure à sa température limite de surchauffe ;
- Consécutivement à la montée du réservoir en pression et au maintien de cette pression à des valeurs significativement supérieures à la pression d'apparition de la fissure initiale.

Il devient alors évident que les BLEVE les plus redoutables se produisent lorsqu'un réservoir très résistant subit une rupture locale qui déclenche une vaporisation explosive.

#### I.4.3.2. Les causes du BLEVE :

Ce phénomène peut se produire principalement lorsqu'une source de chaleur intense rayonne sur les parois d'un réservoir contenant un produit sous pression.

L'incendie peut avoir plusieurs origines :

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

- La formation d'un feu de nappe provenant de la combustion d'un produit inflammable répandu sur le sol, soit à proximité d'un réservoir, soit dans son propre bac de rétention.
- L'apparition d'une perte de confinement (fuite au niveau d'un repiquage). Dans ces conditions, le fluide s'enflamme au contact de l'air en enveloppant le réservoir.
- La rupture d'une canalisation provoquant un jet de flammes qui vient chauffer localement la paroi externe d'un stockage.

### I.4.3.3. Les conséquences dévastatrices d'un BLEVE :

Les différents rapports d'accidents survenus sur des sites de stockage et relatant l'explosion d'un ou plusieurs réservoirs de gaz liquéfiés sous pression, exposent généralement d'une manière détaillée les conséquences catastrophiques observées sur les sites eux-mêmes et dans les zones environnantes. On peut ainsi différencier cinq événements dévastateurs distincts :

- Création d'ondes de choc consécutives à l'explosion détonante ;
- Création d'ondes de souffle ;
- Propagation d'un nuage gazeux ;
- Projections par effet missile (morceaux de paroi...) ;
- Formation d'une boule de feu provenant de la combustion du fluide stocké.

#### a./ Les ondes de choc :

L'explosion résultant de la dépressurisation quasi instantanée d'un stockage produit, dans le cas d'un B.L.E.V.E., une détonation qui crée des ondes de choc pouvant être ressenties jusqu'à plusieurs kilomètres.

#### b./ L'effet missile :

C'est le phénomène le plus aléatoire. Les comptes rendus d'accidents sont très significatifs à ce propos : un morceau de paroi pesant plusieurs tonnes et provenant d'un réservoir qui subit un BLEVE. peut être projeté jusqu'à plus d'un kilomètre du lieu de l'explosion.

#### c./ La formation d'une boule de feu :

Le nuage formé à la suite de la rupture mécanique d'un stockage, peut s'enflammer soit s'il a atteint son point d'auto-ignition, soit s'il existe à proximité une source d'ignition (incendie, étincelle...).

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

C'est l'événement le plus redouté de par son ampleur et sa vitesse d'exécution. Un énorme champignon apparaît dans l'atmosphère et la combustion résultante dégage un rayonnement de chaleur de haute intensité (jusqu'à 300 kW 1m<sup>2</sup> à une température pouvant atteindre 2000 °C)[9].

### I.4.4. Nuage toxique :

Un nuage toxique est un type de dispersion atmosphérique.

Un nuage toxique peut en premier lieu provoquer une asphyxie lorsque le corps humain ne reçoit pas suffisamment d'oxygène. Cela se produit surtout en atmosphère confinée. Le problème est local, il dépend par exemple, du taux de renouvellement d'air. Si l'asphyxie n'entre pas trop dans la problématique des dangers que l'unité industrielle peut faire courir à son voisinage, il existe des cas où la modélisation de la dispersion d'un nuage toxique est d'importance[10], [11].

#### I.4.4.1. Déplacement du nuage :

Tableau I. 4: Condition des rejets avec ces résultats

Condition	Résultat
Rejet de grande vitesse	Quantité du mouvement prédominante
Tout rejet	Plus la pression de stockage est grande plus la quantité de mouvement du nuage est importante
Rejet instantané	Mouvement distribué tout autour du centre du nuage. Ne contribue pas au déplacement du nuage
Nuage en contact avec le sol/atteint une couche d'inversion de température	Le mouvement vertical se transforme en mouvement horizontal. Augmentation de la largeur du nuage
Nuage plus dense que l'air	Effondrement sur le sol Turbulence
Nuage au sol a une densité suffisamment petite par rapport à l'air	Nuage décolle

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

### Autres termes :

**Point d'éclair :** température minimale à laquelle, dans des conditions d'essai spécifiques, un liquide dégage suffisamment de gaz ou de vapeurs combustibles pour s'enflammer momentanément par l'application d'une source d'inflammation efficace.[12]

**Température d'inflammation :** température minimale d'une surface chaude, déterminée dans des conditions d'essai spécifiées, à laquelle se produira l'inflammation d'une substance combustible sous forme de mélange de gaz ou de vapeurs avec l'air.[13]

**Source d'inflammation ou d'ignition :** toute source d'énergie suffisante pour initier la combustion. [14]

**Énergie d'allumage minimale :** énergie minimale suffisante pour provoquer l'inflammation de l'atmosphère explosive la plus facilement inflammable dans des conditions d'essai spécifiées.[15]

**Atmosphère explosive :** mélange d'air, dans des conditions atmosphériques, avec des substances inflammables sous forme de gaz, de vapeur, de poussières, de fibres ou de particules en suspension dans l'air dans lequel, après inflammation, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé. [16]

Explosion « *réaction brusque d'oxydation ou de décomposition entraînant une élévation de température, de pression ou les deux simultanément* ». [17]

L'explosion peut prendre deux formes principales [15]:

**Déflagration :** « explosion se propageant à une vitesse subsonique »

« L'onde de pression est de 4 à 10 bars. »

**Détonation :** explosion se propageant à une vitesse supersonique et caractérisée par une onde de choc.

« Les surpressions atteignent 20 à 30 bars et La vitesse supersonique dans les gaz imbrûlés, de l'ordre de 1000 à 3000m/s »

**Limites de détonation :**

Pour qu'il y ait détonation, il faut que la composition du mélange gazeux soit comprise entre les limites de détonation.

La zone de détonation se situe de part et d'autre de la concentration stœchiométrique du combustible dans le mélange gazeux, à l'intérieur de la zone d'inflammabilité ;

**Limite inférieure d'explosivité (LIE) :** « la fraction volumique de gaz ou vapeurs inflammables dans l'air au-dessus duquel une atmosphère de gaz explosif ne se forme pas, exprimé en pourcentage ». [18]

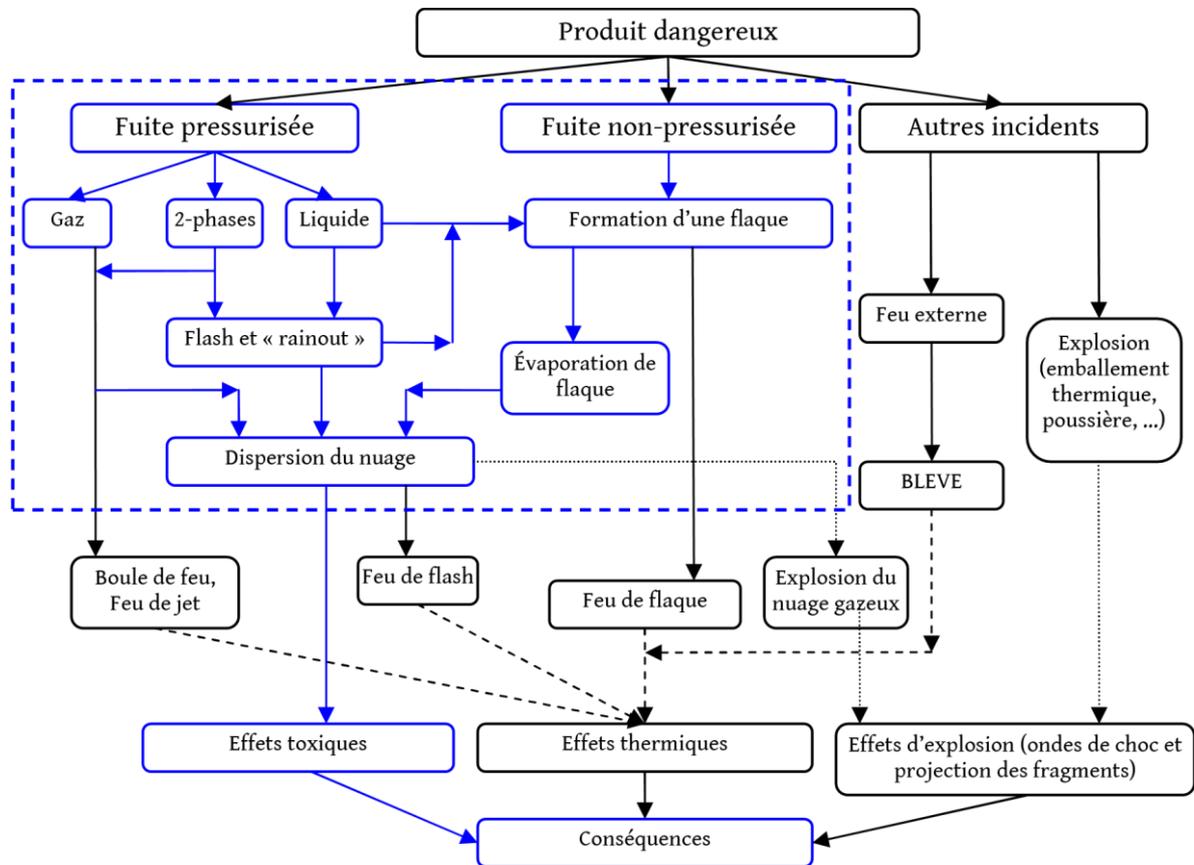
## **Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux**

**Limite supérieure d'explosivité (LSE) :** concentration en volume au-dessus de laquelle un gaz ou une vapeur inflammable en présence d'air ne peut pas être enflammé. [19]

**Température d'inflammation** Température la plus basse à laquelle l'inflammation se produit lorsqu'on applique la méthode prescrite dans la présente norme.[20]

### I.5. Méthodologie d'identification des scénarios d'accidents :

L'industrie pétrolière joue un rôle crucial dans le monde énergétique d'où la multiplication des scénarios accidentels. Le rejet accidentel de ces matières pétrolières peut avoir lieu pendant les phases de transport, de stockage ou de fabrication. Les diverses conséquences d'un rejet accidentel de matières pétrolières dangereuses sont illustrées dans la figure I. 3.



**Figure I. 3:** Principaux phénomènes dus au rejet d'une substance dangereuse (d'après Pitblado et Turney, 1996).

Les conséquences des effets toxique, thermique et mécanique sont évaluées à partir de divers phénomènes tels que la boule de feu, le feu de jet, le feu de flaque, la dispersion du nuage toxique, l'explosion du nuage, .... Par exemple, dans le cas de fuite diphasique du gaz pétrolier liquéfié (GPL) (produit toxique et inflammable), stocké sous forme de liquide sous pression à une température ambiante, d'une part le phénomène de la dispersion du nuage permet d'évaluer les effets de la dispersion du nuage de gaz toxique et d'autre part les effets thermiques sont pris en compte à partir des phénomènes tels que la boule de feu, le feu de jet ou le feu de flash. L'explosion du nuage inflammable pendant la phase de dispersion entraîne des effets thermiques et mécaniques à cause des ondes de choc.

### I.5.1. Termes sources

Les sources d'émissions de produit toxique et/ou inflammable dans les raffineries et les unités de production chimique ont été analysées par Gelevan et Siegell (1999). Les défaillances d'équipement (rupture de canalisation, fuite sur des pompes ou des vannes...) constituent la catégorie la plus importante qui entraîne la libération de produit dangereux. La perte de confinement dépend fortement des caractéristiques du rejet :

- Perçage d'une paroi, défaillance d'un joint, défaillance d'une garniture ;
- Éclatement d'un disque de rupture, ouverture d'une soupape ;
- Brèche partielle ou totale d'une canalisation courte ou longue ;
- Éclatement d'un réservoir.

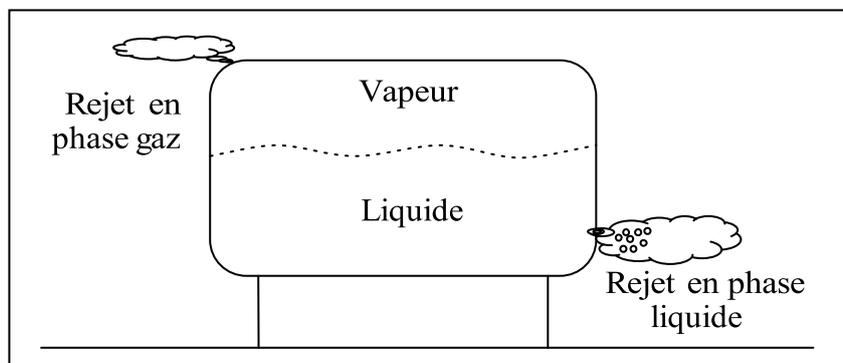
Pour caractériser la dispersion atmosphérique d'une substance toxique et/ou inflammable, il est nécessaire de quantifier le rejet, c'est-à-dire de calculer son débit, sa température et son état physique. La détermination de ce « terme source » est très importante car elle définit les conditions initiales de formation du nuage ainsi que la génération éventuelle d'un aérosol et/ou d'une flaque. Il est donc important de le calculer avec précision.

Le mode d'émission de produit peut être classé en deux grandes catégories : le rejet instantané (par exemple un éclatement du réservoir) et le rejet continu (par exemple vidange de réservoir sous pression pendant une heure).

#### I.5.1.1. Les rejets continus :

##### a./ Fuite sur une paroi de réservoir :

Ce terme source correspond à une brèche sur la paroi d'un réservoir ou à un petit trou sur une canalisation de grand diamètre qui se comporte alors comme un réservoir (Figure I. 4).



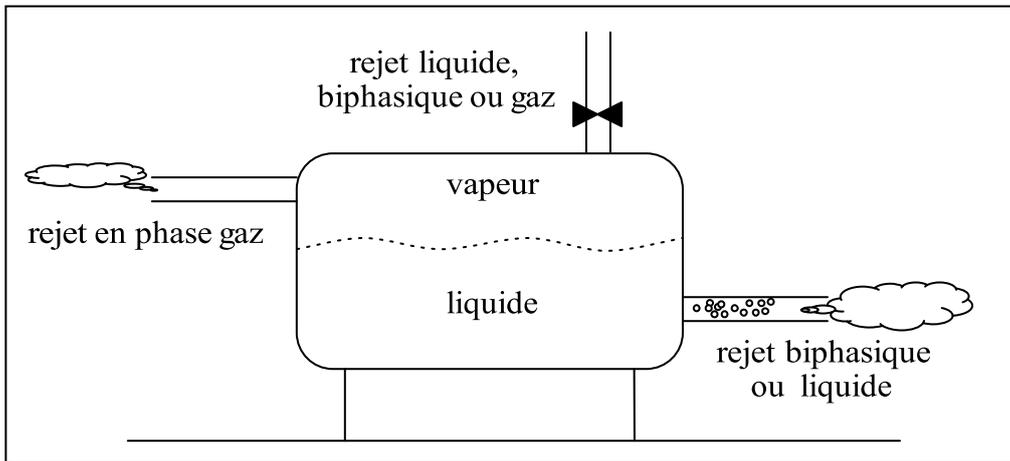
*Figure I. 4: Fuite sur une paroi de réservoir*

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

Dans un stockage biphasique, la nature de la phase du produit rejeté dépend de la position de la brèche (Figure 4). Dans le cas où la brèche se situe au-dessous du niveau du liquide dans le réservoir, la phase de rejet liquide peut « flasher » pendant l'expansion à pression ambiante.

### b./ Rupture totale d'une canalisation courte :

La rupture guillotine d'une canalisation courte sur un réservoir peut entraîner un changement de phase du produit dans la canalisation avant qu'il soit rejeté dans l'atmosphère. La phase du produit rejeté dépend de la position de la canalisation sur le réservoir, comme le montre la Figure I. 5.

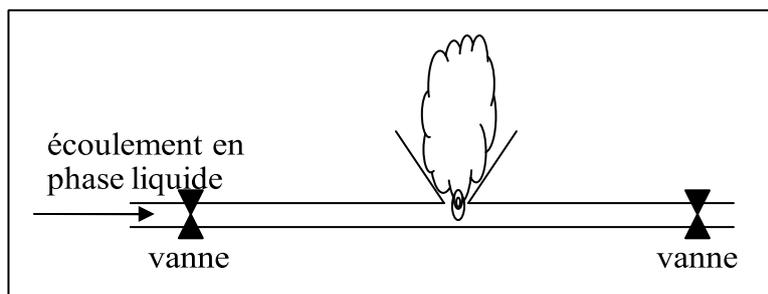


**Figure I. 5:** Rupture totale d'une canalisation courte

Si le produit est un liquide volatile, il peut flasher dans la canalisation. Ce changement de phase est calculé avec les lois de la thermodynamique. Si la longueur de la canalisation est très importante par rapport au diamètre (par exemple, longueur supérieure à 300 fois le diamètre), alors le phénomène d'écoulement dans la canalisation devient plus complexe.

### c./ Fuite à partir d'une canalisation longue :

Ce terme source concerne les rejets biphasiques ou gazeux issus d'une ouverture totale ou partielle sur une canalisation longue, dont le débit varie en fonction du temps.



**Figure I. 6:** Rupture sur une canalisation longue

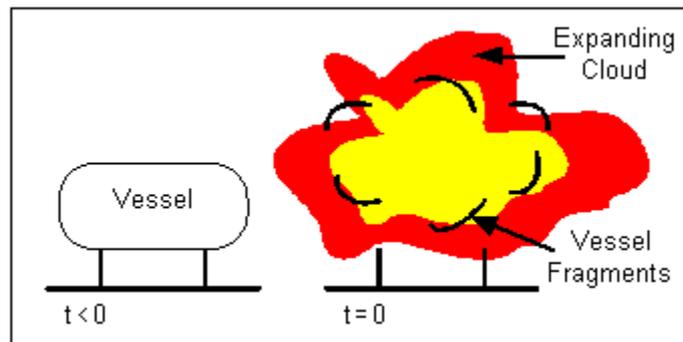
Le calcul doit prendre en compte les caractéristiques de la canalisation et du produit en amont et en aval de la brèche. Il faut par exemple tenir compte de la fermeture automatique des

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

vannes situées en amont ou en aval de la brèche, ce qui conditionne la masse totale de produit rejeté (Figure I. 6). La modélisation de ce terme source est plus complexe que le modèle simple utilisé pour une canalisation courte.

### I.5.1.2. Les rejets instantanés

La ruine, encore appelée rupture catastrophique, consiste en la rupture totale du confinement entraînant un relâchement immédiat et instantané de la totalité du contenu (Figure I. 7). Les rejets de type instantané sont principalement caractérisés par la quantité émise dans l'atmosphère et la pression de la capacité au moment de la rupture. Cette dernière peut être différente dans certains cas de la pression de stockage.



**Figure I. 7:** Rupture catastrophique d'un réservoir

Lors d'un rejet instantané de gaz, en l'absence d'obstacle de taille significative à proximité, l'expansion initiale du nuage est relativement isotrope. Il en résulte un volume gazeux sphérique, ou semi-sphérique si l'émission a lieu au niveau du sol. Dans un cas de rejet en phase liquide, il peut se former une flaque.

## I.6. Reconstitution d'accident

Historiquement, la réglementation en matière de sécurité industrielle a toujours évolué à la suite d'un accident majeur (Seveso en 1976, Piper Alpha en 1988, AZF en 2001, etc.). Ces accidents tragiques sont généralement la combinaison d'erreurs humaines, de dysfonctionnements d'équipements et de non-identification préalable des risques.

Voici quelque accident majeur les plus connues dans le monde de la sphère de stockage de GPL :

### I.6.1. Catastrophe de Feyzin[21], [22] :

La raffinerie de Feyzin, mise en service en 1964, traite 1,7 Mt/an de pétrole. Sa zone de stockage de GPL comprend 12 850 m<sup>3</sup> (capacité théorique 13 100 m<sup>3</sup>) d'hydrocarbures sous pression dans 10 sphères de propane ou de butane. Les sphères sont au plus proche à 22,50 m

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

de l'autoroute A7. Un aide opérateur prélève un échantillon lors d'une purge sur une sphère de propane de 1 200 m<sup>3</sup> remplie à 60 %. Après plusieurs incidents, une procédure opératoire stricte avait été établie pour purger les sphères (ouverture de la vanne supérieure, puis progressivement de la vanne inférieure sans jamais l'ouvrir à fond). A 6h40, l'aide opérateur manœuvre dans le mauvais ordre les vannes en série qui givrent et se bloquent en position ouverte. Une fuite de propane génère un nuage inflammable qui dérive lentement jusqu'à l'autoroute. Des voitures le traversent sans conséquences. Mais à 7h15, une voiture arrêtée à 100 m du point de fuite sur le CD4 longeant l'autoroute allume le nuage ; son chauffeur grièvement brûlé décèdera ultérieurement. Un violent chalumeau apparaît sous la sphère 1 min plus tard. Les secours de la raffinerie, de Vienne et de Lyon arrivés entre 7 h et 8h30, essaient de refroidir les sphères voisines et d'éteindre la torchère géante qui prend une nouvelle ampleur après l'ouverture des soupapes de sécurité sur le haut de la sphère mise en cause. Celle-ci explose brutalement vers 8h45 (1er BLEVE) en faisant 13 victimes. La boule de feu culmine à 400 m de hauteur et atteint 250 m de diamètre. Une sphère voisine de propane explose à son tour à 9h40 (2ème BLEVE) sans faire de victimes. Le bilan humain est lourd : 18 morts dont 11 sapeurs pompiers et 84 blessés sur 158 personnes présentes. D'importants dommages matériels sont observés : inflammation des réservoirs voisins et ouverture de plusieurs sphères de stockage, missiles dus aux BLEVEs retrouvés à plus de 700 m dont l'un de 48 t à 325 m, immense cratère à la place des 2 sphères, 8 000 m<sup>3</sup> (1 500 t) de produits pétroliers perdus. Le souffle de l'explosion est perçu jusqu'à Vienne (16 km au sud) et 1 475 habitations ont été atteintes. Des responsabilités pénales sont retenues envers l'aide opérateur et l'agent de sécurité pour méconnaissance des consignes. Le Directeur du site est également mis en cause. En matière civile, des dommages et intérêt sont retenus. Cette catastrophe entraîne de profondes réformes de la réglementation et de l'administration chargée du contrôle des installations classées.

### I.6.2. San Ixuatepec, Mexique 1984 [22]:

A environ 5h35 le 19 novembre 1984, un incendie majeur et une série d'explosions catastrophiques ont lieu sur le terminal PEMEX GPL à San Juan Ixuatepec, Mexico. Trois raffineries approvisionnent le site tous les jours en GPL. Parce que la veille le site était quasiment vide, il se faisait alors approvisionner par une raffinerie à 400 km de là. Deux grandes sphères et 48 cylindres étaient lors remplis à 90% et quatre petites sphères étaient à 50% pleines. La salle de contrôle ainsi qu'une station de pompage remarquent une chute de pression. Une canalisation de 8'' entre une sphère et une série de cylindres s'est rompue. Cependant, les opérateurs ne parviennent pas à identifier la cause de la chute de pression. La fuite de GPL dure

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

alors depuis 5 à 10 minutes lorsque le nuage de gaz, estimé à une surface de 200 m x 150 m à 2 m de haut se dirige vers une torchère. Le nuage s'enflamme générant une forte surpression. Plusieurs incendies se déclarent. Les opérateurs du site essaient alors de gérer la situation. Un employé finit par déclencher le bouton d'arrêt d'urgence. Environ 15 minutes après le début de la fuite, un premier BLEVE a lieu. Durant l'1h30 qui suit, une série de BLEVE se produit. L'importance des quantités impliquées, la rapidité du développement de l'accident, la proximité des habitations (les plus proches sont à 100 m environ des réservoirs) et le type de construction expliquent la gravité du bilan : officiellement 600 morts et 7 000 blessés, 39 000 personnes évacuées et 4 000 sauveteurs impliqués.

### I.6.3. Explosion dans un complexe de GNL – Skikda – Algérie [23]:

Une explosion se produit vers 18h40 dans un complexe pétrochimique portuaire, situé sur la côte et comprenant 6 unités de traitement de gaz et d'hydrocarbures. 12 000 personnes travaillent sur ce site qui est en partie alimenté par du gaz et du pétrole en provenance du Sahara.

L'accident se produit dans l'unité traitant du gaz naturel (GNL), à la suite de l'explosion d'une chaudière à haute pression fabriquant de la vapeur. Sous la violence de l'explosion, des réservoirs de substances inflammables à proximité sont endommagés à leur tour : les fuites qui en résultent provoquent l'extension de l'incendie en différents foyers et de nouvelles explosions (effet domino). Le souffle de l'explosion, entendue à 10 km à la ronde, brise les vitres d'immeubles et commerces du voisinage. Une cellule de crise est mise en place par l'exploitant et le ministère de l'intérieur, le préfet local ("wali") déclenche l'équivalent du PPI. Les secours doivent lutter 8 h pour maîtriser l'incendie.

Le bilan final est très lourd : 27 victimes parmi les employés dont 9 gardiens ou agents de sécurité situés dans un poste proche et 74 blessés (dont 43 sortiront le lendemain après examens). La plupart des décès est liée aux effets de surpression ou de projection et effondrements de structures.

L'estimation des dégâts matériels se monte à 800 M de dollars. 3 des 6 unités de liquéfaction sont détruites. Des débris sont projetés jusqu'à 250 m du point de l'explosion mais les dégâts restent limités au site.

Selon un des témoins, des bruits anormaux correspondant à des vibrations ou à des fuites sur soupapes auraient été entendus avant l'explosion violente. L'unité ("train 40") où s'est produite l'explosion, semblait présenter des anomalies de fonctionnement régulières. Suite à une fuite importante signalée par un agent de maintenance qui décèdera dans l'explosion, un mélange d'air et d'hydrocarbures gazeux aurait été aspiré par l'entrée d'air de la chaudière du

## **Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux**

train n°40. Cette aspiration aurait provoqué une première explosion à l'intérieur de cette dernière, suivie d'une seconde déflagration à l'extérieur puis d'un incendie détruisant les "trains" n°20 et 30 voisins espacés de 60 m les uns des autres.

### **I.7. Méthodes d'analyse des risques :**

#### **I.7.1. Introduction :**

L'analyse des risques est une étape essentielle de la gestion des projets innovants et toute discipline est caractérisée par son objet d'étude et sa démarche ou méthode. La méthode est une démarche organisée et rationnelle de l'esprit pour arriver à un certain résultat. Elle est également caractérisée par son aspect quantitatif et qualitatif et en fonction du type de risque étudié.

##### **I.7.1.1. Méthode déductive :**

Dans une approche déductive, le système est supposé défaillant et l'analyse porte sur l'identification des causes susceptibles de conduire à cet état. On part alors des effets pour remonter aux causes. L'arbre des défaillances constitue une des principales méthodes déductives.

##### **I.7.1.2. Méthode inductive :**

Une défaillance ou une combinaison de défaillances est à l'origine de l'analyse. Il s'agit alors d'identifier les conséquences de cette ou ces défaillances sur le système ou son environnement. On dit généralement que l'on part des causes pour identifier les effets.

### **I.7.2. Domaines d'application :**

Les outils d'analyse des risques doivent être choisis en fonction des caractéristiques des installations à étudier et du niveau de détail rechercher.

Bien entendu, le domaine d'application et le niveau de détail sont également fonction des compétences et de l'expérience des personnes qui mèneront ce travail. En d'autres termes, certains outils peuvent être adaptés afin d'être utilisés dans un domaine d'application sensiblement différent de leur domaine d'origine[24].

Ces différentes informations sont synthétisées dans le tableau suivant, pour les principales méthodes d'analyse des risques dans le domaine des risques accidentels.

Les différents éléments présentés ci-avant ont été reportés dans le tableau suivant afin de bien différencier les possibilités offertes par les différents outils présentés dans ce document.

**Tableau I. 5:** Critères de choix pour les plus importantes méthodes d'analyse des risques

Méthodes	Approche	Défaillances envisagées	Niveau de détail	Domaines d'application privilégiés
APR	Inductive	Indépendantes	+	Installations les moins complexes Etape préliminaire d'analyse
HAZOP / What-if	Inductive	Indépendantes	++	Systèmes thermo-hydrauliques
AMDEC	Inductive	Indépendantes	++	Sous-ensembles techniques bien délimités
Arbre d'évènement	Inductive	Combinées	+++	Défaillances préalablement identifiées
Arbre de défaillance	Déductive	Combinées	+++	Evénements redoutés ou indésirables préalablement identifiés
Nœud papillon	Inductive Déductive	Combinées	+++	Scénarios d'accidents jugés les plus critiques

**I.7.3. APR (Analyse Préliminaire des Risques) :**

Consiste à identifier les divers éléments dangereux présents dans le système étudié et à examiner pour chacun d'eux comment ils pourraient conduire à une situation accidentelle plus ou moins grave, suite à un évènement initiant une situation potentiellement dangereuse.

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

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

A partir de ces éléments dangereux, l'APR vise à identifier, pour un élément dangereux, une ou plusieurs situations de dangers. Dans le cadre de ce document, une situation de dangers

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

est définie comme une situation qui, si elle n'est pas maîtrisée, peut conduire à l'exposition de cibles à un ou plusieurs phénomènes dangereux.

L'utilisation d'un tableau de synthèse constitue un support pratique pour mener la réflexion et résumer les résultats de l'analyse. Pour autant, l'analyse des risques ne se limite pas à remplir coûte que coûte un tableau. Par ailleurs, ce tableau doit parfois être adapté en fonction des objectifs fixés par le groupe de travail préalablement à l'analyse.

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

**Tableau I. 6:** Exemple de tableau de type « APR »

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

### I.7.3.1. Limites et avantages :

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations. Par rapport aux autres méthodes présentées ci-après, elle apparaît comme relativement économique en terme de temps passé et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé. Cet avantage est bien entendu à relier au fait qu'elle est généralement mise en œuvre au stade de la conception des installations.

En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes.

Comme son nom l'indique, il s'agit à la base d'une méthode préliminaire d'analyse qui permet d'identifier des points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées. Elle permet ainsi de mettre en lumière les équipements ou installations qui peuvent nécessiter une étude plus fine menée grâce à des outils tels que l'AMDEC, l'HAZOP ou l'analyse par arbre des défaillances. Toutefois, son utilisation seule peut être jugée suffisante dans le cas d'installations simples ou lorsque le groupe de travail possède une expérience significative de ce type d'approches.

### I.7.4. Arbre des défaillances :

Permet de déterminer les diverses combinaisons d'évènements qui génèrent une situation indésirable unique, dont le diagramme logique est réalisé au moyen d'une structure arborescente.

ADD a pour objectif « qualitatif » est de construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à un événement redouté et d'évaluer l'effet d'une modification du système, de comparer les conséquences des mesures qui peuvent être envisagées pour réduire l'occurrence de l'événement redouté étudié.

L'objectif « quantitatif » est d'évaluer la vraisemblance de la survenue de l'événement étudié à partir des combinaisons d'événements élémentaires qui peuvent le produire. Si on connaît les probabilités de ces événements on peut en déduire la probabilité de l'événement étudié et l'impact sur celle-ci d'une réduction (ou augmentation) de telle ou telle des probabilités élémentaires.

À défaut d'une quantification par probabilités, l'arbre permet d'apprécier le nombre de scénarios conduisant à l'événement étudié, le nombre minimum d'événements ou de conditions suffisant pour qu'il arrive, etc.

#### I.7.4.1. Limites et avantages :

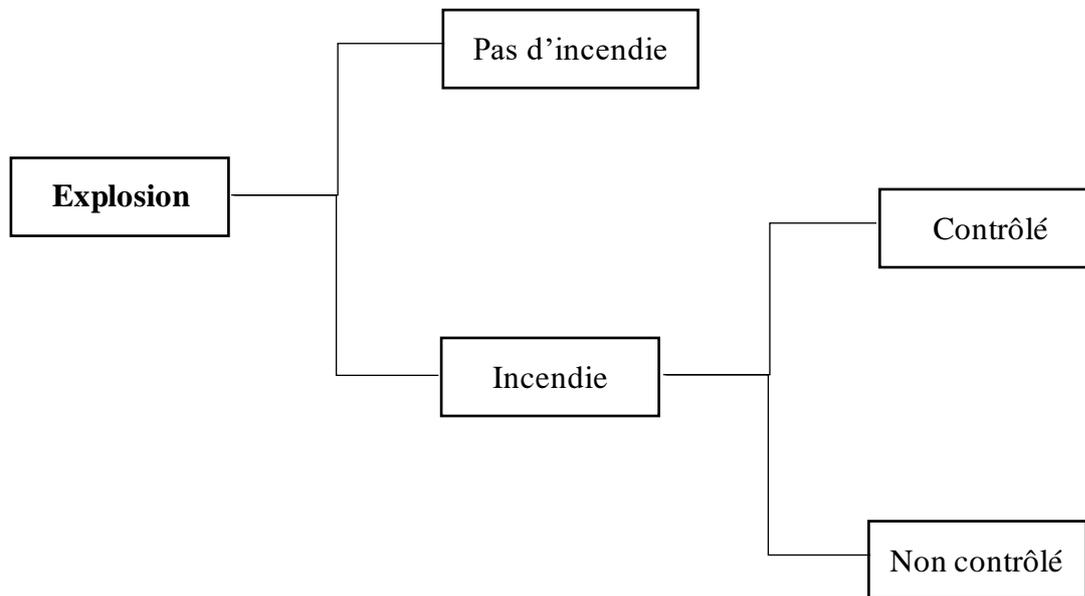
- Méthode qualitative et semi-quantitative précise qui est le travail d'une équipe pluridisciplinaire ;
- Fait intervenir les combinaisons d'événements ;
- Permet de déterminer les chemins critiques et facilite le choix des actions de préventions ;
- Peu appropriée aux phases transitoires et aux procédés discontinus ;
- Pour l'exploitant La méthode permet de rechercher toutes les causes d'un événement redouté, méthode assez similaire à l'analyse de l'accident par l'"arbre des causes" mais réalisée a priori[25].

### I.7.5. Arbre d'évènement :

Permet d'élaborer un diagramme présentant l'ensemble de éventualités résultant de diverses combinaisons d'évènements. Le développement de l'arbre débute par un évènement initiateur et progresse selon une logique binaire : chaque évènement conduit à identifier deux états successifs possibles, l'un acceptable et l'autre non. Cette démarche fournit ainsi la séquence logique des différents évènements susceptibles de se produire en aval de l'évènement primaire e permet donc leur évaluation. (voir Figure 8)

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

L'objectif est de décrire les scénarios d'accident à partir d'un événement initiateur. Cette méthode est appropriée lorsque le fonctionnement du système étudié est approximativement chronologique, mais discret. Le fonctionnement du système est qualifié de « discret » dans le sens où les événements considérés sont ponctuels dans le temps. Cette méthode permet de comparer l'efficacité de différentes mesures (de prévention ou de protection) dédiées à la réduction de l'impact d'un événement initial.



**Figure I. 8:** Exemple d'Arbre d'évènement

### I.7.5.1. Limites et avantage :

Cette méthode est basée sur une démarche naturelle très facile à s'approprier. Elle permet la recherche de tous les enchaînements d'événements. La qualité des conclusions dépend de la qualité et de l'exhaustivité de la liste des éléments et comportements potentiels des sous événements pris en compte. Elle permet d'estimer l'influence d'un facteur en faisant varier sa probabilité de réalisation. Elle permet de suivre le déroulement d'un scénario accidentel et d'évaluer l'influence des barrières mis en œuvre sur la fréquence des conséquences [26].

Associée aux arbres de défaillance, elle permet de connaître le nombre d'événements intermédiaires indispensable pour conduire à l'événement redouté (coupes minimales).

Les facteurs d'aggravation peuvent se confondre avec des défaillances. La détermination des facteurs d'aggravation dépend fortement des connaissances de l'analyste. Elle ne permet cependant pas la prise en compte des causes indirectes (non chronologique).

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

### I.7.6. AMDE et AMDEC :

- AMDE : consiste à considérer systématiquement, l'un après l'autre, chacun des composants du système étudié et à analyser les causes et les effets de leurs défaillances potentielles ;
- AMDEC : équivalent à l'AMDE, en y ajoutant la criticité du mode de défaillance, dont l'estimation nécessite la connaissance des probabilités d'occurrence des défaillances, et les gravités de leurs effets [27].

L'AMDE est une méthode inductive d'analyse qui permet :

- ✓ D'évaluer les effets et la séquence d'évènements provoqués par chaque mode de défaillance des composants d'un système sur les diverses fonctions de ce système,
- ✓ Déterminer l'importance de chaque mode de défaillance sur le fonctionnement normal du système et en évaluer l'impact sur la fiabilité, la sécurité du système considéré,
- ✓ Hiérarchiser les modes de défaillances connus suivant la facilité que l'on a à les détecter et les traiter.

Dans les faits, il est intéressant de se doter de tableaux tant en qualité de support pour mener la réflexion que pour la présentation des résultats. Un exemple de tableau est fourni ci-dessous.

**Tableau I. 7:** Exemple d'un tableau de type AMDEC<sup>1</sup>

Equipement Repère	Fonctions, états	Mode de défaillance	Causes de défaillance	Effet local	Effet final	Moyens de détection	Dispositifs de Remplacements	P	G	Remarques

#### I.7.6.1. Limites et avantages :

L'AMDEC s'avère très efficace lorsqu'elle est mise en œuvre pour l'analyse de défaillances simples d'éléments conduisant à la défaillance globale du système. De par son caractère systématique et sa maille d'étude généralement fine, elle constitue un outil précieux

---

<sup>1</sup> Ce tableau est globalement cohérent avec celui proposée dans la norme CEI-60812. La colonne grisée constitue un ajout visant à caractériser la gravité a priori du mode de défaillance considéré.

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

pour l'identification de défaillances potentielles et les moyens d'en limiter les effets ou d'en prévenir l'occurrence.

Comme elle consiste à examiner chaque mode de défaillance, ses causes et ses effets pour les différents états de fonctionnement du système, l'AMDEC permet d'identifier les modes communs de défaillances pouvant affecter le système étudié. Les modes communs de défaillances correspondent à des événements qui de par leur nature ou la dépendance de certains composants, provoquent simultanément des états de panne sur plusieurs composants du système. Les pertes d'utilités ou des agressions externes majeurs constituent généralement des modes communs de défaillance.

Dans le cas de systèmes particulièrement complexes comptant un grand nombre de composants, l'AMDEC peut être très difficile à mener et particulièrement fastidieuse compte tenu du volume important d'informations à traiter. Cette difficulté est décuplée lorsque le système considéré comporte de nombreux états de fonctionnement.

Par ailleurs, l'AMDEC considère des défaillances simples et peut être utilement complétée, selon les besoins de l'analyse, par des méthodes dédiées à l'étude de défaillances multiples comme l'analyse par arbre des défaillances par exemple.

### **I.7.7. HAZOP (HAZard and OPerability study):**

Etudie l'influence de déviations des divers paramètres régissant le procédé analysé par rapport à leurs valeurs nominales de fonctionnement. A l'aide de mots-clefs, les dérives imaginées de chaque paramètre sont examinées systématiquement afin de mettre en évidence leurs causes, leurs conséquences, les moyens de détection et les actions correctrices.

L'objectif de la méthode HAZOP est, à l'origine, d'identifier les dysfonctionnements de nature technique et opératoire dont l'enchaînement peut conduire à des événements non souhaités. Il s'agit donc de déterminer, pour chaque sous-ensemble ou élément d'un système bien défini, les conséquences d'un fonctionnement hors du domaine d'utilisation pour lequel ce système a été conçu [28], [29].

#### **I.7.7.1. Limites et avantages :**

- Bien que les études HAZOP aient fait preuve d'une extrême utilité dans différentes industries, la technique a des limites dont il convient de tenir compte dans le choix d'une application.
- HAZOP est une technique d'identification des dangers qui étudie individuellement les parties d'un système et examine méthodiquement les effets des déviations sur chaque partie. Parfois,

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

un danger grave va impliquer une interaction entre un certain nombre de parties du système. Ceci peut imposer une étude plus détaillée du danger, faisant appel à des techniques telles que l'analyse par arbre d'événement ou l'analyse par arbre de panne.

- Le succès d'une étude HAZOP dépend en grande partie de la capacité et de l'expérience du chef d'étude et de la connaissance et de l'expérience des membres de l'équipe et de leurs interactions.
- HAZOP ne considère que les parties qui apparaissent sur le plan de conception, Les. activités et les opérations qui n'y apparaissent pas ne sont pas prises en compte [30].

### **I.7.7.2. Identification des dangers (par méthode HAZOP) :**

La méthode HAZOP est considérée parmi les meilleures méthodes d'analyse des risques. Cette méthode est particulièrement utile pour l'examen d'un système thermo-hydraulique. Les objectifs d'application de la méthode HAZOP :

- Recherche systématiquement des causes possibles de dérive de tous les paramètres de fonctionnement d'une installation ;
- Mise en évidence des principaux problèmes de stockage et d'entretien ;
- Etude des conséquences et risques éventuels liés à ces dérives propositions des mesures correctives appropriées.

Donc l'objectif principal de l'application de cette méthode, est la détermination des différentes déviations liées au fonctionnement d'un équipement principal dans le système de stockage du GPL.

### **I.7.7.3. Etudes d'identification des dangers durant les différentes phases de la vie utile du système :**

Les études HAZOP constituent l'un des outils d'analyse structurée des dangers le plus approprié dans les dernières phases de la conception détaillée pour examiner les ressources d'exploitation et dans les cas où des modifications ont été effectuées sur les ressources existantes. L'application d'HAZOP et d'autres méthodes d'analyse à un système durant les différentes phases de son cycle de vie est décrite en détail ci-après.

#### ***a./ Phase de concept et de définition***

Dans cette phase du cycle de vie d'un système, on décide du concept et des principales parties du système, mais la conception détaillée et la documentation nécessaire à l'exécution de l'étude HAZOP n'existent pas. Cependant, il est nécessaire d'identifier au cours de cette phase les principaux dangers afin de pouvoir les prendre en considération dans la conception et de

## **Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux**

faciliter les études HAZOP ultérieures. Pour l'exécution de ces études, il convient d'utiliser d'autres méthodes fondamentales. (Ces méthodes sont décrites dans la CEI 60300-3-9.)

### ***b./ Phase de conception et de développement***

Durant cette phase du cycle de vie, on met au point une conception détaillée, on décide des modes d'exploitation et l'on prépare la documentation. La conception arrive à maturité et est gelée. Le meilleur moment pour exécuter une étude HAZOP se situe juste avant le gel de la conception. A ce stade, la conception est suffisamment détaillée pour recevoir des réponses significatives au mécanisme de questions de HAZOP. Il importe de disposer d'un système qui évalue les implications de tout changement effectué après l'exécution de HAZOP. Ce système est normalement conservé pendant toute la vie du système.

### ***c./ Phase de fabrication et d'installation***

Il est recommandé de procéder à une étude avant démarrage du système, si la mise en service et l'exploitation du système présentent un danger potentiel et que les séquences d'exploitation et instructions d'utilisation sont critiques, ou lorsqu'il y a eu un changement substantiel d'intention dans une phase tardive. Il est nécessaire à ce stade que des données supplémentaires, telles que les instructions de mise en service et d'utilisation soient disponibles. De plus, il convient que l'étude examine toutes les questions soulevées durant les études antérieures pour s'assurer qu'elles ont été résolues.

### ***d./ Phase d'exploitation et de maintenance***

Il convient d'envisager la réalisation d'une étude HAZOP avant la mise en œuvre de tout changement susceptible d'affecter la sécurité ou l'exploitabilité d'un système, ou d'avoir des effets sur l'environnement. Il convient également de mettre en place une procédure de révisions périodiques d'un système, afin de contrecarrer les effets des « changements sournois ». Il importe que la documentation de conception et les instructions d'utilisation utilisées dans une étude soient à jour.

### ***e./ Phase de mise hors service ou de mise au rebut***

Dans cette phase, il arrive qu'une étude soit nécessaire pour déterminer les sources de dangers qui peuvent ne pas exister en exploitation normale. S'il existe des comptes-rendus d'études précédentes, cette étude peut être réalisée rapidement. Il est recommandé de garder les comptes-rendus pendant toute la durée de vie du système pour permettre de traiter rapidement les questions de mise hors service.

## Chapitre I : Généralité sur les phénomènes dangereux

### I.7.7.4. Résultats de l'étude :

Il convient qu'une étude HAZOP aboutisse au moins aux résultats suivants :

- Des détails sur les dangers et problèmes d'exploitabilité identifiés, ainsi que des détails sur les dispositions prises, le cas échéant, pour leur détection et/ou leur atténuation ;
- Des recommandations d'études plus poussées sur des aspects particuliers de la conception utilisant différentes techniques, si nécessaire ;
- Les mesures nécessaires pour résoudre des incertitudes découvertes au cours de l'étude ;
- Des recommandations pour l'atténuation des problèmes identifiés, basées sur la connaissance que l'équipe a du système (si ceci entre dans le cadre de l'étude) ;
- Des notes attirant l'attention sur des points particuliers à résoudre dans les procédures d'exploitation et de maintenance ;
- Une liste des membres de l'équipe pour chaque session ;
- Une liste de toutes les parties considérées dans l'analyse, avec le motif de leur exclusion pour celles qui ont été exclues ;
- La liste de tous les schémas, spécifications, fiches techniques, rapports, etc., mentionnant les numéros de révision utilisés par l'équipe.

Pour les comptes rendus par exception, ces résultats tiendront normalement assez facilement dans les feuilles de travail HAZOP. Pour les comptes rendus intégraux, les résultats peuvent avoir à être extraits des feuilles de travail de l'étude globale.

### I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre les notions de base sur les risques, un apport théorique sur les différents scénarios catastrophiques et la réglementation applicable suite à la survenue des catastrophe industriel survenue ont étaient discutées, ainsi qu'un aperçu sur les méthodes d'analyse développer pour mieux maîtriser ces risques. comme la dispersion de nuage de gaz inflammable suite a une perte de confinement est l'évènement initiateur de tous scénarios catastrophiques. Le prochain chapitre présente une apport théorique détaillé sur la dispersion de gaz, et une introduction sur le modèle tridimensionnel de dispersion de gaz.

# *Chapitre II :*

*Modélisation CFD de la dispersion  
atmosphérique des gaz*

### II.1. Introduction :

Au niveau industriel, la modélisation des effets de la dispersion gaz peut avoir de nombreux objectifs. Outre la reconstitution d'accident, elle intervient par exemple lors de la réalisation des études de dangers réglementaires imposées à tous les sites Seveso seuil haut (les installations ayant le potentiel de danger le plus important de par la quantité de produit dangereux stockés). Dans ce cas, le calcul des effets des phénomènes dangereuse lié au GPL a pour objectif de fournir des critères de dimensionnement pour les installations que l'on souhaite protéger. Pour cela, le spécialiste dispose aujourd'hui d'une grande panoplie de méthodes disponibles.

Les modèles de dispersion sont maintenant couramment utilisés pour évaluer l'environnement des impacts des sources d'émissions atmosphérique, concevoir des réseaux d'échantillonnage, calculer des concentrations dans l'air ambiant, etc. Leur emploi demande cependant une certaine uniformisation afin que les résultats puissent être utilisés ou analysés le mieux possible.

Le dernier outil a utilisé notamment été marquée par des expertises, des outils CFD (Computational Fluid Dynamics). Ces outils sont, en théorie, les plus aptes à modéliser correctement les phénomènes dangereux lié a la dispersion de nuage de gaz.

Les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics), parfois appelés outils 3D, qui permettent de résoudre le système d'équations de la mécanique des fluides. Ces modèles tridimensionnels permettant de simuler le comportement des gaz plus lourds que l'air.

Un domaine d'application maintenant est en développement et l'intégration de ces outils de calculs dans des systèmes de surveillance et de prévision en temps réel.

## **II.2. Modèle tridimensionnels de dispersion atmosphérique :**

### **II.2.1. Généralités**

Les modèles numériques tridimensionnels ou CFD (Computational Fluid Dynamics) permettent de simuler les rejets de gaz en prenant en compte l'ensemble des phénomènes intervenant de façon significative sur la dispersion, qu'ils soient liés à l'atmosphère comme la turbulence thermique, ou au site comme les obstacles ou le relief.

Ces modèles s'attachent donc à résoudre directement le système d'équations physiques qui gouverne la dispersion sans le dégrader comme dans la démarche des modèles de type intégral.

Le système d'équations du modèle physique est composé de [31] :

- La conservation de la quantité de mouvement ;
- La conservation de l'énergie ;
- La conservation de la masse d'air ;
- La conservation de la quantité de produit ;
- L'équation d'état du mélange gazeux ;
- L'équation donnant la masse molaire du mélange.

A ces équations peuvent bien sûr être ajoutées d'autres équations afin de tenir compte de l'humidité, ou encore d'éventuelles réactions chimiques...

Les logiciels Fluidyn Panair, FLACS, Fluent, Aria risk sont des modèles de type CFD/3D.

Ce type d'outil est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes. Les simplifications des équations de la mécanique des fluides sont beaucoup moins poussées que celles effectuées dans les modèles intégraux. La validation de certains outils CFD peut nécessiter un calage empirique de quelques paramètres. Les outils CFD tridimensionnels ont un champ d'application étendu et prennent en compte les débits variables et les sources multiples.

La modélisation tridimensionnelle apporte des informations qualitatives en plus des résultats quantitatifs. En pratique, les outils de calcul CFD tridimensionnels ne permettent pas toujours de calculer le terme source. Le terme source doit donc être évalué avec un autre outil. Dans ce cas, les données d'entrée de ce terme source doivent être traduites le plus fidèlement possible dans l'outil de calcul CFD. Par ailleurs, la plupart des outils CFD tridimensionnels ne peuvent traiter directement les mécanismes liés à des rejets diphasiques. Dans de telles situations, c'est un terme source « équivalent » totalement gazeux qui est fourni comme donnée d'entrée, ce qui exige une bonne connaissance des mécanismes d'évolution des phases liquides

## Chapitre II : modélisation CFD de la dispersion atmosphérique des gaz

lors de leur rejet accidentel et peut être une source d'erreur importante. L'utilisation de ce type d'outil nécessite du personnel « spécialisé », du matériel de calcul performant et surtout des données complètes et précises dont l'acquisition est indispensable pour la modélisation. La précision dépend de la méthode de résolution (différences finies, volumes finis, éléments finis), du maillage utilisé et de la manière d'utiliser les modèles (critères d'arrêt et de convergence)[32].

### II.2.2. Avantages et inconvénients :

Les avantages des modèles tridimensionnels permettent de palier à de nombreuses limitations identifiées pour d'autres types de modèles tels les modèles gaussiens ou les modèles intégraux :

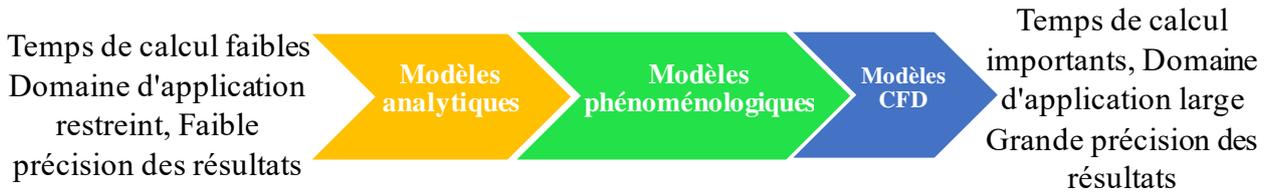
- Le modèle prend en compte la réalité du terrain, les obstacles, même près de la source ;
- Il est permis une grande liberté de choix quant aux types de sorties que l'on peut obtenir : champ de concentrations en temps réel pour quelques points particuliers, champ de concentration dans tout l'espace.
- Une modélisation CFD permet ainsi de prendre en compte : la géométrie réelle des installations, les caractéristiques du nuage inflammable réel, les compositions d'onde.

Toutefois, des inconvénients dans l'emploi des modèles tridimensionnels subsistent tels :

- Une mise en œuvre complexe due essentiellement à la lourdeur du système lui-même ;
- Des temps de calcul longs (plusieurs heures voire plusieurs jours) ;
- Un matériel informatique important ;
- Nombreux paramètres numériques et données d'entrée ;
- Temps de calcul important ;
- Précision dépendant de la méthode de résolution, du maillage utilisé, des conditions aux limites, du choix des modèles de turbulence...

### II.2.3. Synthèse :

La figure 9 synthétise les principales caractéristiques des modèles. Par rapport les autres modèles comme Les modèles analytiques sont ainsi simples et rapides à utiliser mais ont un domaine d'application restreint. À l'opposé, les modèles CFD qui fournissent une meilleure représentation de la physique des phénomènes. Entre ces deux extrêmes, on trouve les modèles phénoménologiques.



**Figure II. 1 :** Synthèse des principaux avantages de chaque approche ( Source : d 'après A. Champassith , 2013 - Techniques de l'Ingénieur)

## **II.3. Objectifs et principes de la modélisation de la dispersion atmosphérique :**

### **II.3.1. Objectifs**

L'objectif de la modélisation de la dispersion atmosphérique est de connaître, en tout point de l'espace et à tous les instants, les concentrations en espèces relâchées. Il convient à ce niveau de distinguer deux types de relâchement atmosphérique[33] :

- Celui qui résulte suite à un incident ou un accident (fuite d'un récipient de gaz par exemple)
- Et celui issu du fonctionnement normal d'une installation (rejet de « routine » lié au procédé de l'installation).

En modélisation, ces deux situations sont traitées de manières différentes car elles ne font pas appel aux mêmes types de données, notamment météorologiques. En effet, les rejets de routine sont modélisés à partir de statistiques météorologiques alors que les rejets accidentels sont modélisés à partir de données météorologiques locales observées ou prévues.

À cet objectif de description de la dispersion atmosphérique, ajoutons celui d'estimer l'impact des polluants dispersés sur les populations et leur environnement (les écosystèmes).

### **II.3.2. Les principaux mécanismes de la dispersion atmosphérique :**

Un gaz ou flamme rejeté dans l'atmosphère est soumis aux différents mécanismes régissant les écoulements de l'atmosphère. Il existe ainsi trois processus principaux qui sont le transport, la diffusion et le dépôt au sol du polluant.

La dispersion d'une pollution par voie atmosphérique est très dépendante des conditions météorologiques. Les paramètres météorologiques ayant une influence notable sur les mécanismes de la dispersion atmosphérique sont le vent, la turbulence de l'atmosphère et la distribution verticale de température, appelée aussi gradient thermique. Ces paramètres interviennent au sein même des trois processus de la dispersion atmosphérique que sont le transport, la diffusion et les dépôts au sol.

## Chapitre II : modélisation CFD de la dispersion atmosphérique des gaz

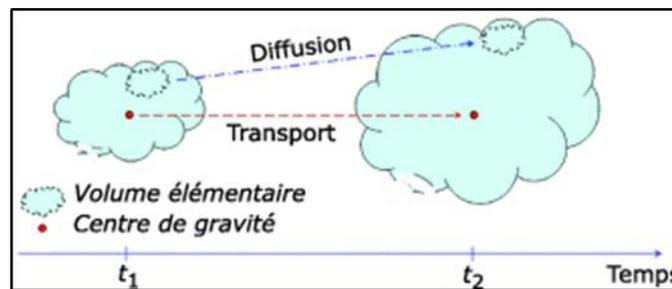
La dispersion atmosphérique comporte 2 évènements importants :

### II.3.2.1. Le transport :

Le transport est la partie physique de la dispersion atmosphérique liée au vent et aux caractéristiques propres des polluants lors de leur émission (vitesse, température, densité).

### II.3.2.2. La diffusion :

Par la turbulence atmosphérique est le déplacement relatif des volumes élémentaires de nuage par rapport à son centre de gravité (figure 9). La diffusion est la partie de la dispersion imputable à la turbulence de l'atmosphère. On distingue deux échelles de turbulences, petites et grandes, en fonction de leur initiateur.



**Figure II. 2:** Représentation du processus de dispersion atmosphérique (d'après F. Jourdain, 2007 - Techniques de l'Ingénieur)

### II.3.2.3. L'équation fondamentale générale de la diffusion-dispersion :

L'équation fondamentale générale de la diffusion-dispersion d'un gaz prend en compte, selon un axe (X, Y, Z) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = (D_x + D_{tx}) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + (D_y + D_{ty}) \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + (D_z + D_{tz}) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

- La concentration massique du gaz dispersé par unité de vent (C)
- u, v, w sont les composantes de la vitesse instantanée suivant les trois axes
- X, Y, Z sont les coordonnées d'un point de nuage dispersé respectivement sous le vent (Ox)
- Orthogonalement au vent dans un plan horizontal Oy et dans un plans verticale Oz
- $D_x, D_y, D_z$  : coefficients respectifs de diffusion moléculaire suivant Ox, Oy, Oz
- $D_{tx}, D_{ty}, D_{tz}$  : coefficients respectifs de diffusion turbulente suivant Ox, Oy, Oz
- t : le temps de transfert depuis l'initiation de l'émission

En considérant que les vecteurs v et w sont nuls, l'équation fondamentale générale de la diffusion-dispersion d'un gaz utilise la loi de distribution gaussienne dans l'espace.

## Chapitre II : modélisation CFD de la dispersion atmosphérique des gaz

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = (D + D_t) \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$$

Mais cette solution n'est pas aisée à utiliser (problème à utiliser les coefficients de diffusion moléculaire  $D$  et  $D_t$ ), une façon plus facile c'est de caractériser la dispersion atmosphérique qui croît avec le degré de turbulence de l'atmosphère par des écarts types de distribution de vitesse.

### II.3.3. Modélisation de la dispersion d'un gaz :

Les modèles de dispersion étudient la dispersion du gaz en deux temps :

- Dans un premier temps la phase de modélisation. Il est impératif de prendre en compte les forces de gravité (lorsque la masse volumique du mélange initial constituant le nuage est supérieure à celle de l'air atmosphérique) car elles sont supérieures dans le champ proche au début de la dispersion ;
- Lorsque les masses volumiques respectives du nuage et de l'atmosphère sont sensiblement identiques, le modèle gaussien de dispersion passive prend le relais après la délicate mise en œuvre des conditions de transition et de raccordement.

Le processus de dispersion du gaz peut se décomposer en deux phases :

- La création du nuage est représentée par un rayon  $R_0$  et une hauteur  $H_0$ , de composition homogène et de masse volumique uniforme  $\rho_{m0}$ . En fonction de la quantité de gaz rejeté, les dimensions du cylindre correspondent soit à une hauteur égale au rayon, soit en présence d'une cuvette de rétention à une valeur du rayon déduite de la surface de base de la cuvette et en conséquence à une hauteur en fonction du rejet émis.
- L'effondrement et le rampement sur le sol du nuage : elle décrit comme une variation des dimensions du cylindre en fonction du temps avec une augmentation du rayon  $R$  et une diminution de la hauteur  $H$  et la concentration  $\rho_m$  est supposée uniforme à tout instant.

L'évolution du rayon du nuage cylindrique est exprimée par la relation :

$$R^2 = R_0^2 + \frac{4}{3} \left[ \left( (\rho_m - \rho_{air} / \rho_{air}) \times g \dot{V} / \pi \right)^{0,5} \right] \times t^{1,5}$$

Où

$\dot{V}$  : le débit volumique du rejet continu  $m^3/s$

$R$  : rayon du cylindre en mètre

$\rho_m$  : masse volumique du nuage en  $kg \cdot m^{-3}$

$\rho_{air}$  : masse volumique de l'air en  $kg \cdot m^{-3}$

## Chapitre II : modélisation CFD de la dispersion atmosphérique des gaz

Les concentrations dans un nuage de gaz dense est utilisé pour des émissions instantanées et continues d'un gaz intense. Nous avons besoin, pour la construction du nomogramme, des connaissances volumique  $V_0$  initial du rejet instantané, du débit volumique  $V_0$  à du rejet continu, de la vitesse  $u$  du vent mesuré à l'altitude de 10 mètres, de l'ambient et de la distance  $x$  sous le vent.

### II.3.4. Conditions météorologiques :

Les conditions météorologiques peuvent être caractérisées par de nombreux paramètres. Ces principaux paramètres sont représentatifs de la turbulence atmosphérique, de la vitesse de vent et de la température.

Donc ces conditions météorologiques ont une influence importante sur la dispersion des polluants. Elles sont définies par :

- La structure de l'atmosphère (stabilité atmosphérique) ;
- Le profil vertical de la vitesse du vent ;
- Les profils verticaux de la température et de la pression atmosphériques ;
- L'humidité atmosphérique.

#### II.3.4.1. Structure de l'atmosphère :

La turbulence atmosphérique joue un rôle important pendant la dispersion et la dilution du nuage. Le phénomène de turbulence dans l'atmosphère peut avoir deux origines : mécanique (liée aux tourbillons créés par la différence de vitesse des masses d'air,) ou thermique (liée aux tourbillons créés par la différence de température des masses d'air). La quantification de cette turbulence est assurée par la classe de stabilité atmosphérique. Il existe plusieurs définitions des classes de stabilité.

Une couche limite atmosphérique est la dispersion du produit se produisant que dans la couche inférieure de l'atmosphère dans le cadre du risque accidentel.

La structure de l'écoulement du vent et du champ des températures sont caractérisés par deux paramètres fondamentaux :

- Le gradient vertical de vitesse ;
- Le gradient vertical de température.

Ces gradients vont particulièrement être influencés principalement par deux mécanismes physiques :

- Les effets de frottement de l'air sur le sol ;
- Les échanges de chaleur entre le sol et l'atmosphère.

## Chapitre II : modélisation CFD de la dispersion atmosphérique des gaz

La couche limite atmosphérique peut être décomposée en deux parties :

- Couche de surface (fort gradient de vitesse du vent) ;
- Couche de transition (rotation de la direction du vent à travers la couche, force de frottement n'ont plus d'effet...).

La Météorologie pour définir la stabilité selon le gradient thermique vertical [34]:

- Atmosphère instable : dans de telles situations, la dispersion des polluants est facilitée. Ces situations apparaissent par fort réchauffement du sol. Elles se retrouvent principalement le jour en absence de vent fort.
- Atmosphère neutre : ces situations permettent la dispersion des polluants. Elles correspondent aux situations de vents modérés ou à des situations de ciel couvert. Il s'agit de la situation la plus fréquente en zone tempérée.
- Atmosphère stable : de telles situations freinent le déplacement des masses d'air. Elles sont induites par des inversions thermiques près du sol, ce qui limite la dispersion des polluants. Ces situations se retrouvent principalement la nuit par vent faible.

### II.3.4.2. Le profil vertical de la vitesse du vent :

Est l'un des paramètres météorologiques les plus importants pour le transport et la dispersion des polluants.

Il utilise la direction et la vitesse pour intervenir à différentes échelles. L'impact du vent sur la pollution atmosphérique varie en fonction de l'emplacement de la source. Généralement, la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Au fur et à mesure que les polluants augmentent, la diffusion du vent favorise la diffusion. Plus le vent est fort, plus le niveau de pollution est bas.

En revanche, le vent à faible vitesse est propice à l'accumulation locale de polluants [35].

### II.3.4.3. Les précipitations :

Par effet mécanique, elles entraînent les molécules gazeuses qui se déposent au sol et conduisent à un appauvrissement du nuage par dépôts humides.

### II.3.4.4. L'humidité :

La vapeur d'eau présente dans l'air peut interagir avec le produit rejeté par divers processus physico-chimiques (hydrolyse, etc...)

## **Chapitre II : modélisation CFD de la dispersion atmosphérique des gaz**

### **II.3.4.5. La rugosité du sol :**

La rugosité du sol que constituent les obstacles naturels ou artificiels (couvert végétal, habitations, falaise, vallée, irrégularité de terrain...) modifie ponctuellement les paramètres tels que le vent, le régime tourbillonnaire, la température.

### **II.4. Conclusion :**

Par ce chapitre on a présenté un aperçu théorique sur la modélisation des phénomènes catastrophiques en particulier la dispersion de nuage de gaz. On a montré que la dispersion suit des modèles mathématiques pour mieux comprendre la dispersion en tridimensionnel en prenant en considération plusieurs paramètres tels que : le temps la vitesse la distance la hauteur

La modélisation par CFD nous a permis de mieux comprendre la direction du nuage de gaz selon plusieurs conditions afin d'établir les barrières les plus adéquates et aux bons emplacements.

Afin de mettre en pratique ces notions théoriques rapportées sur les deux premiers chapitres, le site de GP1Z fait l'objet de cas d'étude.

# ***CHAPITRE III :***

*Etude et modélisation de la dispersion du  
nuage de gaz*

### III.1. Introduction :

L'objectif du présent chapitre est d'établir une étude technique comprenant des informations relatives au complexe GP1/Z. Il est rédigé de façon à rendre accessible, et d'une manière plus étendue sur la zone stockage de GPL et ces installations de sécurité ainsi que les caractéristiques météorologiques de la zone industrielle d'Arzew sont bien détaillés.

par ailleurs une considérations sur les caractéristiques de rejets accidentels de la dispersion des gaz, puis sur le phénomène physique relativement complexe de la dispersion atmosphérique de ces rejets est présenté et vers la fin les résultats obtenu sur les divers types de modèles de dispersion qui existent.

D'autre partie nous avons consacré à la présentation la modélisation de la dispersion des gaz par un autre logiciel très précis sur les calculs IN:FLUX avec des interprétons sur les résultats obtenus.

### III.2. Description de complexe GP1Z :

Le gaz de pétrole liquéfié connu sous le terme de GPL, dont l'Algérie est l'un des leaders producteurs exportateurs dans le monde, constitue l'une des priorités des plans de développement et de la politique énergétique de la SONATRACH.[36]

Le complexe à pour objet de la séparation du GPL en propane et butane. Le GP1/Z ou " JUMBO GPL " s'étend sur une surface de 120 hectares sur la bande de terre comprise entre la route nationale 11, et le bord de la mer méditerranée.

Le complexe a été construit en trois phases avec le concours d'un Consortium Japonais IHI- ITOCHU, après un contrat passé le 11 Décembre 1978, la première phase de quatre trains a été réceptionnée en 1984, la seconde phase de deux trains en 1998, et la troisième phase de trois trains en 2010.

Le complexe a pour mission de produire du Butane, et le Propane, par le traitement du GPL par le procédé distillation sous pression, Provenant en plus grande partie du grand sud Algérien, des champs pétroliers: Complexe Hassi Messaoud, Hassi R'Mel , Ain Amenas...etc.

#### III.2.1. Situation :

D'une superficie de 120 hectares, le complexe GP1/Z est situé dans la zone industrielle d'ARZEW, entre la centrale thermique (MERSAT EL HADJADJ) à l'EST et le complexe GNL3/Z à l'OUEST, entre la mer méditerranée et la route nationale N°11.[37]



### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

- **Une rampe de chargement par camions** : Six (06) camions.
- **Destination de la Production** : Exportation et Marché national.
- **Source d'Approvisionnement** : Gaz en provenance des champs gaziers du sud algérien.
- **Capacité de stockage** :
  - Vingt-deux (22) Sphères de Stockage de la charge : 22 000 m<sup>3</sup>.
  - Quatre (04) Bacs de Stockage de propane réfrigéré : 280 000 m<sup>3</sup>.
  - Quatre (04) Bacs de Stockage du butane réfrigéré : 280 000 m<sup>3</sup>.
  - Quatre (04) sphères, une (01) de propane et trois (03) de butane ambiant : 500 m<sup>3</sup> et 1500 m<sup>3</sup>.
  - Une (01) Sphère de stockage pentane : 500 m<sup>3</sup>
  - **9** trains de traitement du GPL dont trois nouvellement installés
  - **02** unités de récupération des vapeurs de propane et butane (BOG propane et BOG butane).
  - Section dépentanisassions pour les trois trains de la phase III.
  - Section démercurisation.
  - **02** stations électriques assurent l'alimentation du complexe via SONELGAZ.
  - **05** salles de contrôle.
  - **06** générateurs de secours
  - **02** quais de chargement (D1 et M6) pouvant recevoir des navires d'une capacité variant entre 4 000 et 45 000 tonnes du propane et butane.
  - **01** rampe de chargement de camions.
  - **01** station d'eau de mer.
  - **01** unité de déshuilage.
  - **01** unité de neutralisation des déchets liquides.

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

- 02 unités SIDEM de dessalement d'eau de mer.
- 01 système de télésurveillance

#### III.2.3. Les différents départements du complexe GP1/Z :

L'organigramme du Complexe GP1/Z est structuré comme suite :

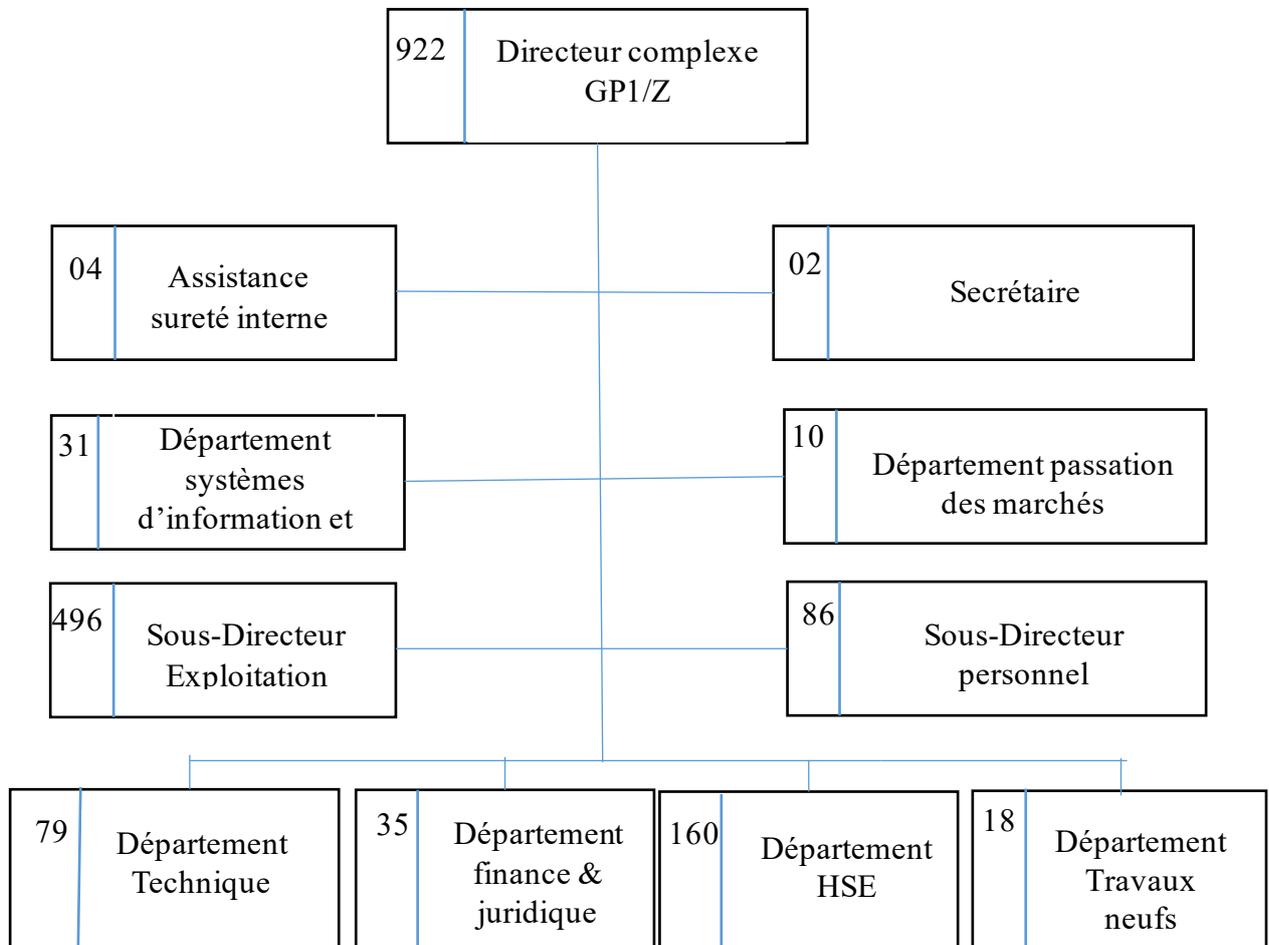


Figure III. 2: L'organigramme du Complexe GP1/Z

### III.2.4. Organisation de sécurité au niveau du complexe GP1/Z : [38]

La philosophie de la sécurité du complexe GP1/Z consiste à éliminer les risques d'incendie, d'explosion ou d'autres accidents prévisibles, et à minimiser les dommages des incidents susceptibles de se produire.

Le but est d'éteindre le feu et éviter toute propagation en arrêtant les circuits des produits inflammables aussi rapidement que possible pour éviter une explosion et des dégâts importants.

#### III.2.4.1. Les éléments importants de la conception de sécurité :

- **Espacement et disposition de l'usine** prévoira un espacement approprié des équipements pour séparer les zones dangereuses, limiter l'extension de l'incendie et permettre un accès efficace pour combattre le feu.
- **Contrôle, indication et alarmes** : l'usine possède un système d'instrumentation et d'électricité qui permet de réaliser des opérations de sécurité rapide autour des installations, au centre de sécurité et dans les salles de contrôle, ces opérations sont réalisées automatiquement et /ou manuellement.
- **Détection des gaz et alarme** : des détecteurs de fuite de gaz automatiques sont situés en des points présentant des risques de fuites de gaz.
- **Alarme incendie** : le réseau d'alarme incendie couvre l'ensemble des zones et des bâtiments des dispositifs à bouton-poussoir sous « verre brisable » sont repartis en grand nombre ils sont munis d'alarme sonores et signalent l'emplacement dans les principaux bâtiments aux fins du service sécurité.
- **Étouffement des feux par la vapeur** : on aura recours dans l'installation à la méthode d'étouffement des feux par vapeur résultant d'une fuite sur tube dans les fours la vapeur sera fournie par l'ouverture d'une vanne de commande à distance.
- **Détecteur de gaz portatifs** : dispatché
- **Télécommunication** : un système de communication à l'intérieur de l'usine et avec l'extérieur pour exploitation en sécurité est prévu.
- **Ignifugeage** : les structures métalliques, pipe-rackes et supports d'équipements seront ignifugés contre les dommages par incendie.

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

- **Équipement de lutte anti-incendie** : des équipements fixes et mobiles de lutte anti-incendie sont prévus pour l'extinction et de refroidissement des équipements.
- **Un arrêt d'urgence**
- **Système de vide –vite** : les vapeurs et liquides inflammable en provenance des soupapes de sureté, de contrôle, de purge, de respiration sont envoyés vers les torches existantes du complexe GP1/Z par un système de vide-vite.

#### III.2.5. L'unité Stockage des produits finis sphères sous pression : [36]

Ces installations se composent de vingt-deux sphères qui stockent temporairement la charge, et ont une capacité globale de 22000 m<sup>3</sup> de GPL brut. Ces sphères sont réparties comme suit : 03 groupes de 04 sphères pour la phase I, un seul groupe identique pour la phase II, un groupe de 06 sphères pour la phase III et 14 pompes d'alimentations de la charge. (voir figure 11).

La charge d'alimentation est livré par RTO (Région Transport Ouest) au complexe GP1/Z en GPL brut en provenance des différents champs du sud (Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Adrar, In Amenas, Tin-Fouye Tabankort et Rhourde Nouss). Elle est acheminée vers le stockage à l'aide d'une pipe de 24". Avant le stockage ; le GPL brut passe d'abord par un collecteur équipé par un contrôleur de pression permettant le maintien d'une pression de service stable puis traverse des filtres afin de signaler l'encrassement.

Ensuite le GPL traverse les dégazeurs de la charge afin de séparer et purger les vapeurs du mélange vers les sphères d'alimentation. Une fois que la charge est filtrée et dégazée, elle passe alors à travers six (06) démercuriseurs pour réduire sa teneur en Mercure jusqu'à l'ordre de 5 nano-g/Nm<sup>3</sup>. A l'issue des démercuriseurs la charge passe par des redresseurs pour rendre l'écoulement laminaire afin d'avoir une lecture correcte du débit et de la densité du GPL. Le GPL brut est acheminé ensuite vers les sphères de charge sous une pression de 18 ~ 22 Kg/cm<sup>2</sup> et une température de 5 ~ 41.8° C.

La charge est stockée dans 22 réservoirs sphériques de capacité de 1000m<sup>3</sup> chacune à des pressions variables entre 7 et 9 bars. Le GPL brut est acheminé par la suite vers les neuf trains du procédé qui fonctionnent en parallèle. Cette opération est assurée par 14 pompes centrifuges multi étages à puisard qui aspirent à partir de ce dernier et refoulent dans le collecteur commun pour approvisionner les trains du procédé à une pression de 30 Kg/cm<sup>2</sup>.



**Figure III. 3:** les sphères de stockage d'alimentation

Les caractéristiques générales des sphères comme suite :

**Tableau III. 1:** Caractéristique générale des sphères de produits finis

Repère N*	Service	Dimension (mm)	Capacité (m <sup>3</sup> )	Calcul		Fonctionnement	
				Temp (°C)	Pression (kg/cm <sup>2</sup> eff)	Temp. (°C)	Pression (kg/cm <sup>2</sup> eff)
07-T-0024	Sphère stockage produit	10,202	500	63/-4	22/4,4	0,5 - 43	0,5 - 18,0
07-T-0025	Sphère stockage produit	10,202	500	63/-4	22/4,4	0,5 - 43	0,5 - 18,0
07-T-0026	Sphère stockage produit	10,202	500	63/-4	22/4,4	0,5 - 43	0,5 - 18,0
07-T-0027	Sphère stockage produit	10,202	500	63/-4	22/4,4	0,5 - 43	0,5 - 18,0

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

#### III.2.5.1. Equipements de contrôles, régulation et sécurité en place :

La sphère de stockage de GPL 07-T-00XX est munie des moyens de prévention et protection principaux suivants :

- Réseau d'eau anti-incendie
- Dévidoirs tournants
- Extincteurs CO<sub>2</sub>
- Extincteurs à poudres
- Réserve émulseur
- Détecteurs de gaz.
- Détection de flamme sur la pomperie à proximité des pompes qui déclenche le déluge d'Eau
- Zones ATEX
- Mise à la terre

#### III.2.5.2. Caractéristiques lié au produits fini stocké dans les sphères de stockage :

##### a. Les Caractéristiques physicochimiques du produit utilisé :

**Tableau III. 2:** Les Caractéristiques physiques et chimiques du produit utilisé (GPL).

Caractéristiques	Valeurs
Type d'installation	Sphère de stockage
Substance	GPL
T service (°C)	20
T calcul (°C)	De -17 à 93.3
P service (bar)	5.34
P épreuve (bar)	9.6
Volume (m <sup>3</sup> )	500
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	536

##### III.2.5.3. Localisation de scénario à étudier :

La figure ci -dessous reprend la localisation de scénario (défaillance de la sphère 07-T-00XX) sur la section de stockage de GPL à GP1/Z.



Figure III. 4: Localisation de scénario

### III.3. Les caractéristiques météorologiques de la région Arzew :

A l'échelle annuelle, on peut dire que les vents dominants sont de secteurs Ouest, Sud - Ouest, Nord et Nord Est. Environ 2% des vents sont compris entre 11 et 16 m/s, 10% sont compris entre 6 et 11 m/s et 8% sont compris entre là 6 m/s. les vitesses du vent les plus fréquentes sont celles qui sont comprises entre 1 et 6 m/s, les vitesses comprises entre 6 et 11 m/s occupent la deuxième position. [39]

L'étude est basée sur la série des vitesses du vent max journalier mesurées à la station d'Arzew pendant l'année 2020 voir figure III. 5.

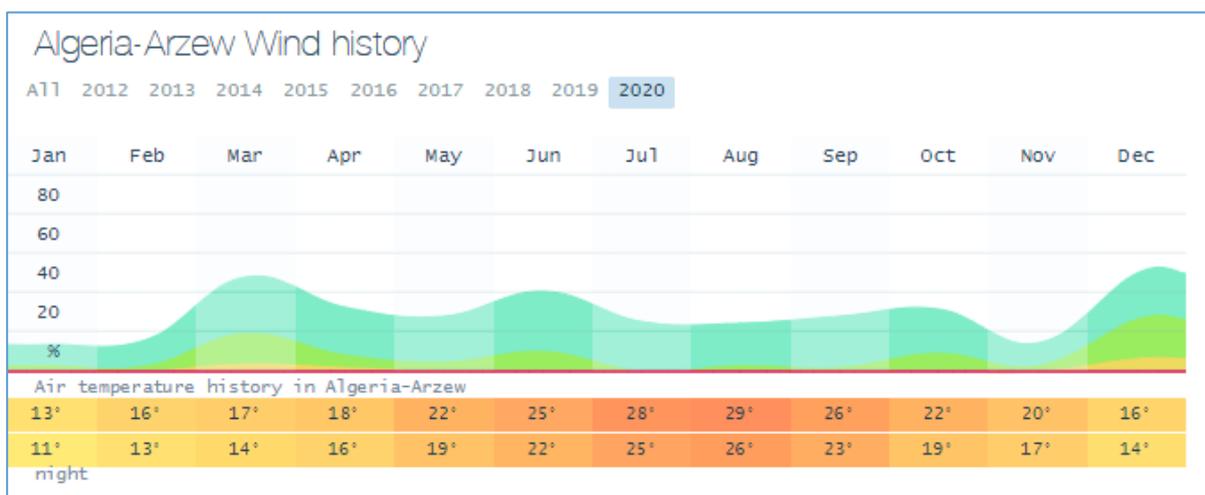


Figure III. 5: Les facteurs climatologique de la région d'Arzew (source : <https://windy.app>)

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

La rose de vent représente la distribution de quatre classes de vent selon huit directions. L'histogramme de fréquences des classes de vitesse représente la distribution fréquentielle des quatre classes de vitesse.



**Figure III. 6:** rose des vent annuelle (2020) (source : <https://windy.app>)

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

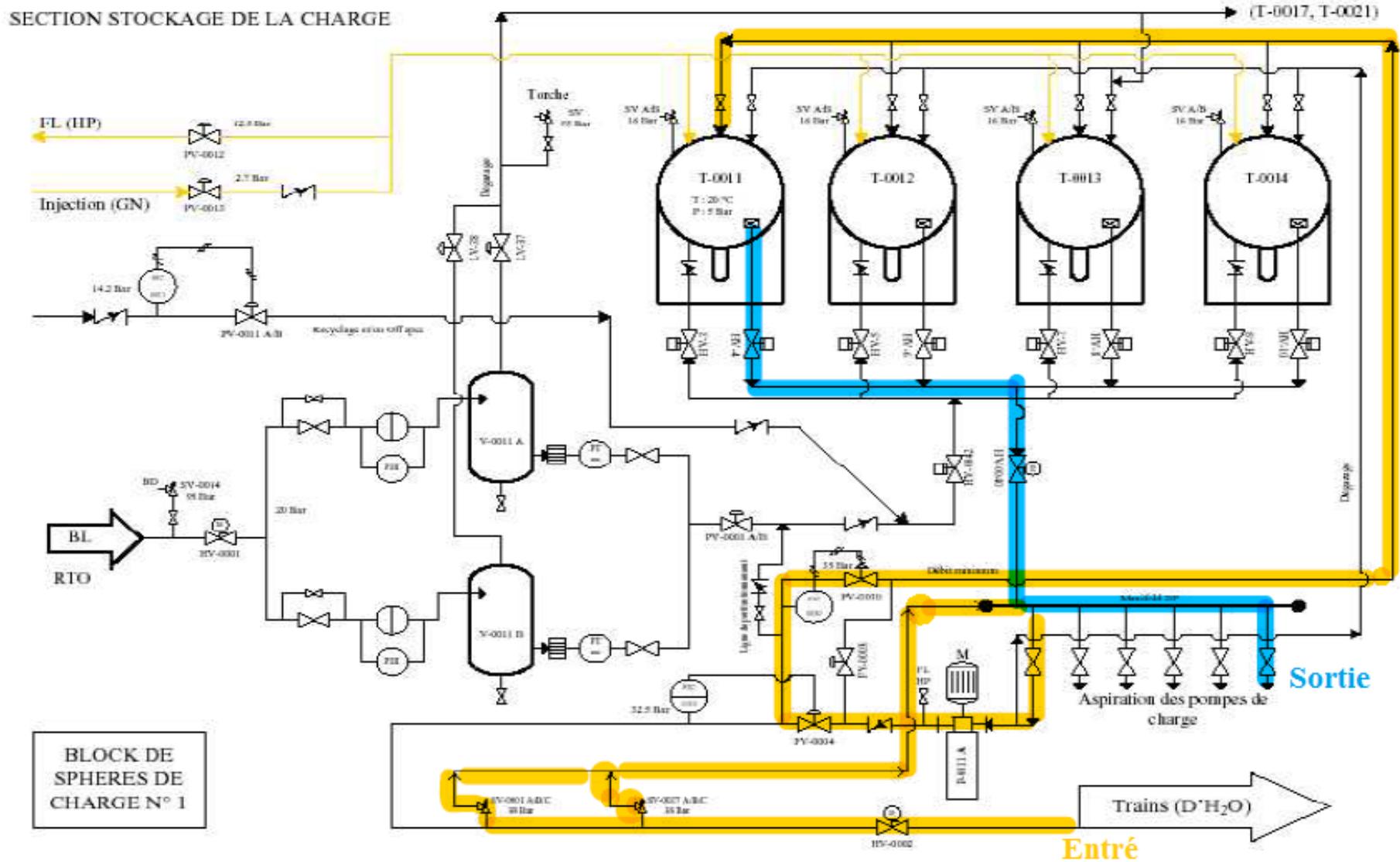


Figure III. 7: zone de stockage de charge (P&ID)

### **III.4. Application du HAZOP sur la sphère de stockage GPL 07-T-00XX :**

Nous avons appliqué la méthode HAZOP sur élément de stockage sphère, après on a passé par la modélisation de phénomène de dispersion de gaz par logiciel PHA-Pro, et par la suite nous avons proposé des mesures en matière prévention, de protection et d'intervention qu'ont étaient comparées aux mesures existant.

la méthode d'analyse de risque HAZOP sur le sous- système (la sphère 07-T-00XX sur la section de stockage de GPL à GP1/Z).

les 5 paramètres choisi pour l'application de la méthode HAZOP:

- Débit ;
- La pression ;
- Température
- Niveau ;
- Fuite.

#### **III.4.1. L'application de la méthode HAZOP au niveau de sphère stockage de GPL :**

Nous avons élaborer notre travail par l'application de la méthode HAZOP, afin d'hierarchiser en fonction des risques les actions possibles pour la sûreté, En utilisant la méthode HAZOP comme ayant pour objectif d'identifier d'une manière structurée et systématique les dangers potentiels et les conséquences résultantes et qui s'avère d'une grande utilité pour déterminer les mesures préventives à mettre en place.

##### **- Elaboration des tableaux HAZOP :**

Les tableaux HAZOP, issus de l'application de la méthode au système de stockage Du GPL de GP1/Z, sont présentés dans les pages suivantes

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

**Tableau III. 3:** Application de la méthode HAZOP au niveau de Sphère de stockage GPL 07-T-00XX

Date :						Activité : stockage de GPL			
Equipements : Sphère de stockage 07-T-00XX						Conditions opératoires : 21 barg et 37°C			
Paramètre	Mot clé	Déviation	Causes	Conséquences	Sécurité existant	Cotation			Recommandation a discuté
						G	P	R	
Pression	Plus de	Haute pression	Pression/débit élève en provenance du nœud précédent - Augmentation de température d'environnement sans refroidissement de la sphère - Sur remplissage (Défaillance de la fermeture HS-0151A/B) - Présence d'une source de chaleur externe (incendie) Haute température	- Augmentation de niveau du fluide à l'intérieur de la sphère - La pression dans la sphère dépasse la valeur maximale (Surpression) Rupture de la paroi de la sphère et Pert de confinement. - Explosion - Jet Fier - BLEVE Rupture ou éclatement des conduites de la sphère - Si la soupape s'ouvert le GPL s'échappe vers l'atmosphère et si elle ne	- Système de Détection feu et gaz - Alarme de pression Haute PAH - Détection feu sur les cuvettes - Capteur de pression ESDV PSV - vanne d'arrêt d'urgence HS - Capteur de température - Soupape de sécurité	4	4	16	- Maintenance régulière des capteurs de pression Et des vannes - Etalonnage et Equilibrage des soupapes de sécurité - L'inspection périodique du système déluge pour le refroidissement et la réduction des flux thermique - Maintenance régulière des capteurs de température - Transfert intermédiaire entre les sphères afin de métriser la pression. - Cuvette de rétention déportée

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

Date :						Activité : stockage de GPL			
Equipements : Sphère de stockage 07-T-00XX						Conditions opératoires : 21 barg et 37°C			
						Volume : 500 m <sup>3</sup>			
			du fluide dans la conduite ou dans le réservoir.	s'ouvre pas possibilité de surpression dans la sphère - Surpression excessive dans la sphère - Dans le cas d'une ignition immédiate la survenu d'un jet fire.					- Couronne de refroidissement sur les sphères - Peinture intumescente sur les sphères - mure blast résiste
pression	Moins de	Basse pression	- Pression/débit faible en provenance du nœud précédent - fuite importante dans la tuyauterie/la paroi de la sphère - Diminution de la température	- Perte De Production - Emet De vapeur Vers Torche - Capacité Vide Dans Les Sphères (implosion). - Cavitation Des Pompes De Remplissage. - L'arrêt Distribution De GPL	- Alarme de pression basse PAL - Contrôle d'indicateur de pression par l'opérateur. - Détecteur de pression	2	3	6	- Ajouter une indication de pression indépendante avec alarmes basse.
Température	Plus de	Haute température	- Propane plus chaud en provenance des	- Température de stockage élevée	- Alarme de température haute	4	4	16	- L'inspection périodique du système déluge pour le

**Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz**

<b>Date :</b>				<b>Activité :</b> stockage de GPL			
<b>Equipements :</b> Sphère de stockage 07-T-00XX				<b>Conditions opératoires :</b> 21 barg et 37°C			
				<b>Volume :</b> 500 m <sup>3</sup>			
		<p>unités précédentes</p> <p>Augmentation de la pression dans le réservoir</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de température ambiante d'environnement sans refroidissement de la sphère</li> <li>- Présence d'une source de chaleur externe (incendie)</li> <li>- Défaillance de système de refroidissement</li> <li>- Défaillance des détecteurs température</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surpression excessive dans la sphère</li> <li>- la survenu d'un point chaud sur la paroi de la sphère et causant le phénomène de BLEVE</li> <li>- Augmentation de la pression et Évaporation élevée du fluide survenu de : UVCE, feu de flash (Jet Fier) Rupture de la sphère avec grande quantité de rejet de gaz inflammable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection feu sur les cuvettes</li> <li>- Détection de gaz</li> <li>- Ouverture des soupapes vers torche et vers atmosphère</li> <li>- Refroidissement la sphère par le courant d'eau.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>refroidissement et la réduction des flux thermique</li> <li>Maintenance régulière des capteurs de température</li> <li>- Transfert intermédiaire entre les sphères</li> <li>Inspection et maintenance régulière des soupapes</li> <li>- Couronne de refroidissement sur les sphères</li> </ul>

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

Date :						Activité : stockage de GPL			
Equipements : Sphère de stockage 07-T-00XX						Conditions opératoires : 21 barg et 37°C			
						Volume : 500 m <sup>3</sup>			
Température	Moins de	Basse Température	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Propane plus froid en provenance des unités précédentes</li> <li>- Température ambiante basse</li> <li>Chute de pression</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chute de pression</li> <li>- Baisse de pression dans la sphère, voir pression moins Impulsion</li> <li>- Perte de production</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détecteur de basse température</li> <li>Et basse pression</li> </ul>	2	3	6	- maintenance et inspection périodique
Débit	Plus de	Débit Plus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus d'écoulement et de production provenant du nœud précédent</li> <li>- Problème sur le refoulement des pompes</li> <li>- Montée de niveau et de pression dans les sphères</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de pression dans la sphère</li> <li>- explosion jet fire ...</li> <li>- Débordement vers torche et pollution atmosphérique =&gt; voir pas de débit</li> <li>- Augmentation de la vitesse de transfert provoque des vibrations sur les pompes</li> <li>- Augmentation de la pression dans la conduite de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PAH- qui donne une alarme de p° haute dans la sphère</li> <li>- LAL qui montre en salle de contrôle un niveau Haut dans les sphères</li> <li>- Démarrage du compresseur pour diminuer la pression</li> </ul>	2	2	4	- L'inspection périodique

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

Date :						Activité : stockage de GPL			
Equipements : Sphère de stockage 07-T-00XX						Conditions opératoires : 21 barg et 37°C			
						Volume : 500 m <sup>3</sup>			
				refoulement des pompes de transfert	- Rythme de Fonctionnement des pompe				
Débit	Moins de	Débit Moins	- Faible ou non écoulement de la source - Fuite au niveau de canal - Arrêt des pompes d'export - Défaillance (fermeture) de la vanne HV	- Perturbation sur la production du GPL - Perte de l'export de GPL (production) - Diminution de niveau dans le réservoir - Augmentation de la pression dans le réservoir Cavitations ou dommages potentiels des pompes	- Détection de niveau et pression aussi	3	2	6	- Maintenance préventive et inspection régulière
Fuite	Petite	Petite fuite	- Fuite de bride - Vanne fuyarde - Fuite de garniture de pompe	- Emission de gaz inflammable à l'atmosphère - Explosion BLEVE jet fire	- Détection feu et gaz au niveau des sphères et au niveau des pompes	4	5	20	- Garniture double sur les pompes - Optimisation des systèmes de détection feu et gaz au niveau de zone de stockage

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

<b>Date :</b>						<b>Activité : stockage de GPL</b>			
<b>Equipements : Sphère de stockage 07-T-00XX</b>						<b>Conditions opératoires : 21 barg et 37°C</b>			
						<b>Volume : 500 m<sup>3</sup></b>			
					- Détecteur Basse pression et Bas niveau				- Inspection périodique et maintenance
Niveau	Plus de	Haut niveau de GPL dans la sphère.	- Débit élève en provenance de l'unité précédente Sur remplissage : - défaillance de capteur de niveau - Défaillance des soupapes de sécurité - Défaillance de la pompe d'exportation	- Risque de surpression et la rupture de la paroi. - Plus de propane dans le réservoir	- Alarme de niveau haut - Sécurités de niveau très haut qui isolent la sphère	3	3	9	- Maintenance régulière des capteurs de niveau
Niveau	Moins de	Basse niveau moins de GPL dans la sphère	- Défaillance des capteurs de niveau en indiquant un haut niveau dans la sphère d'où la fermeture des vannes	-Vidange totale de la sphère et risque de cavitation et d'endommagement des pompes d'export	- Sécurités de niveau très bas qui arrêtent la pompe et ferment la vanne HV	2	4	8	

**Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz**

<b>Date :</b>					<b>Activité :</b> stockage de GPL				
<b>Equipements :</b> Sphère de stockage 07-T-00XX					<b>Conditions opératoires :</b> 21 barg et 37°C				
					<b>Volume :</b> 500 m <sup>3</sup>				
			- Fuite au niveau de la conduite ou le réservoir	- Diminution de la production et du rendement de l'installation - Dispersion du fluide puis une dépression - Dommage environnemental					

III.4.2. Interprétations et résultats :

D'après les résultats du tableau HAZOP on a obtenu :

- Trois évènements inacceptables (fuite, haute température, haute pression) avec une grande criticité.
- Quatre évènements en zone ALARP (haut niveau, basse niveau, débit moins, basse pression)
- Deux évènements acceptables (basse température, plus de débit)

Les évènements inacceptables représentent des lacunes considérables pour notre système, parfois des fuites de gaz très dangereuses et ils sont en priorité pour réduire vers une échelle plus basse d'où la nécessité d'une étude approfondie pour mieux comprendre la cause de ces risques, quelques recommandations sont prescrites sur le tableau HAZOP.

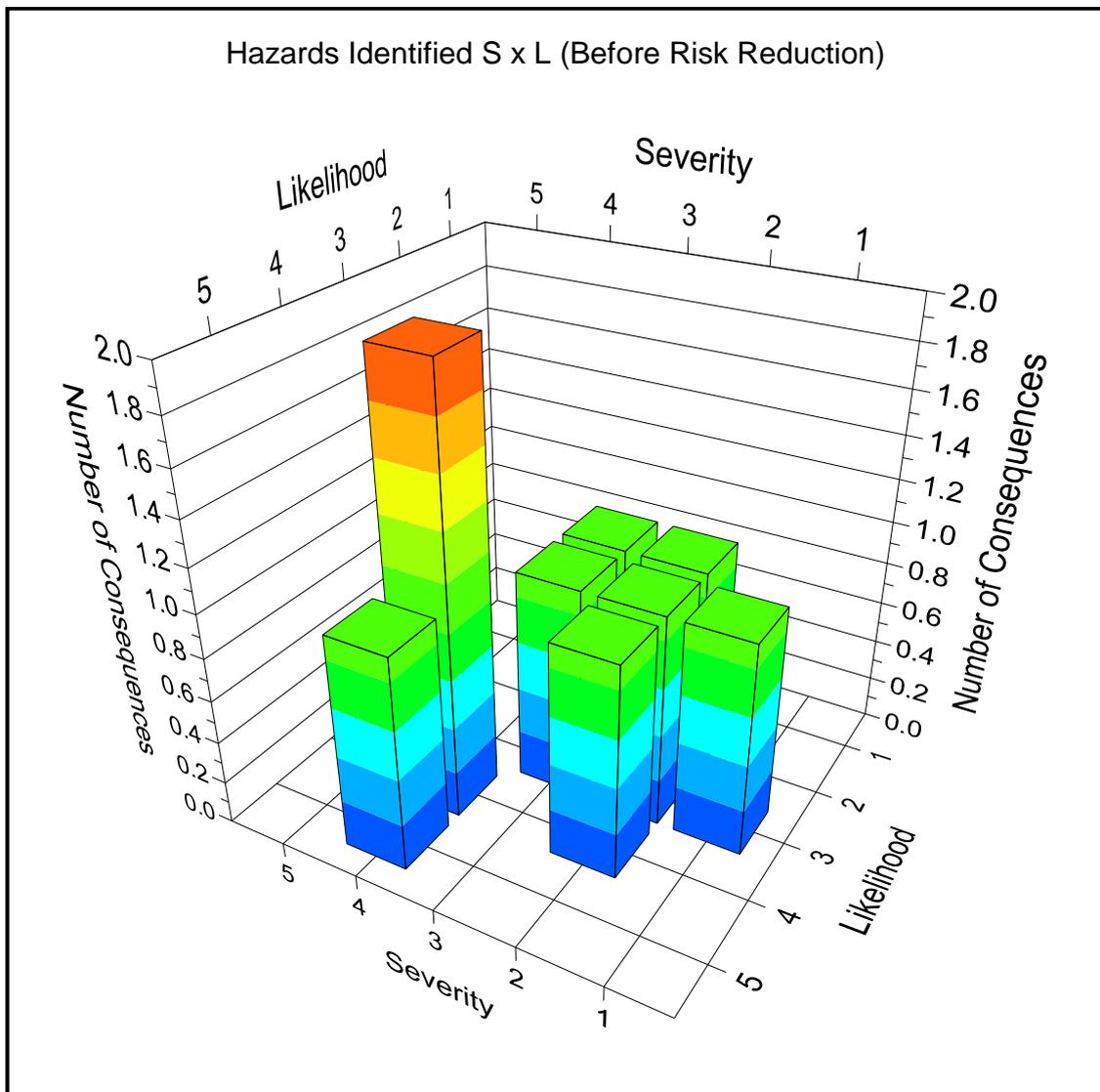


Figure III. 8 : Graphe nombre de conséquences en fonction de la gravité et de la probabilité

**III.4.3. Synthèse sur les résultat HAZOP :**

D'après l'étude HAZOP on déduit que les fuites sont les plus critiques et à l'origine de ces fuites au niveau de la sphère c'est les mauvaises connexions entre les canalisations et la sphère elle-même de ce fait on propose de mettre en place des barrières performantes qui traite cette situation. On se basant sur le risque majeur engendré par ces pertes de confinement ou aux mauvais fonctionnements qui peuvent sûrement exposer tout le complexe et mettre en danger le personnel opérant dans les installations en plus de l'impact sur environnement.

Les résultats obtenus dans notre étude montrent l'importance de l'utilisation de la méthode HAZOP dans la prédiction des scénarios catastrophique, et l'identification des causes possibles de ces scénarios, ce qui nous permettrait de préparer tous les moyens possibles pour éviter les accidents, ou—en cas d'urgence- de minimiser les conséquences éventuelles de tels accidents : dégâts humains et/ou matériel. Dans ce même contexte, nous avons discuté la possibilité d'adaptation d'une telle méthode au niveau de la station, et nous avons proposé quelques pistes d'amélioration.

### **III.5. Modélisation de la dispersion par PHAST la sphère de stockage GPL 07-T-00XX :**

Au niveau de cette section on va modéliser les conséquences de chaque scénario d'accident.

PHAST est un logiciel de modélisation de type intégral qui est capable de traiter différents types de produits pour modéliser les différents phénomènes catastrophiques suite à une perte de confinement. Parmi ces scénarios et le plus répandu c'est la dispersion d'un nuage de gaz dépend des caractéristiques physico-chimiques du rejet (gaz léger, gaz lourd, rejet biphasique...), dans notre cas d'étude nous avons sélectionné et étudié le GPL

une stratégie a été mise en œuvre pour effectuer l'analyse globale de PHAST. L'objectif de cette stratégie est de diviser les scénarios tels que les fuites de gaz et le scénario catastrophique d'un flash fire accidentels en sous scénarios de telle sorte que les sous-scénarios représentent des phénomènes physiques assez différents. Ce découpage a été fait dans le but de faciliter l'interprétation et la compréhension des résultats.

#### **III.5.1. Résultats et discussion :**

La modélisation a été réalisée à l'aide de la version 8.0 du logiciel PHAST. un logiciel développé qui évalue les conséquences d'un rejet accidentel d'un produit dangereux.

La modélisation étudie le scénario par l'évolution d'un accident potentiel depuis le rejet initial jusqu'à sa dispersion. Il applique automatiquement les modèles mathématiques de dispersion en tenant compte des évolutions des paramètres.

Les paramètres d'entrée relatifs à chaque test ainsi que les résultats obtenus sont détaillés à la 1<sup>ère</sup> partie de ce chapitre. Les principaux enseignements à retenir sont présentés ci-après.

En préalable, il a été jugé utile de rapporter des éléments importants relatifs à l'utilisation du logiciel et plus particulièrement à l'exploitation des résultats de calcul.

Equipements : Sphère de stockage 07-T-00XX

Activité : stockage de GPL

Conditions opératoires : 21 barg et 37°C

Volume : 500 m<sup>3</sup>



Figure III. 9: Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers le nord (petite fuite)



Figure III. 10: Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers l'ouest (petite fuite)

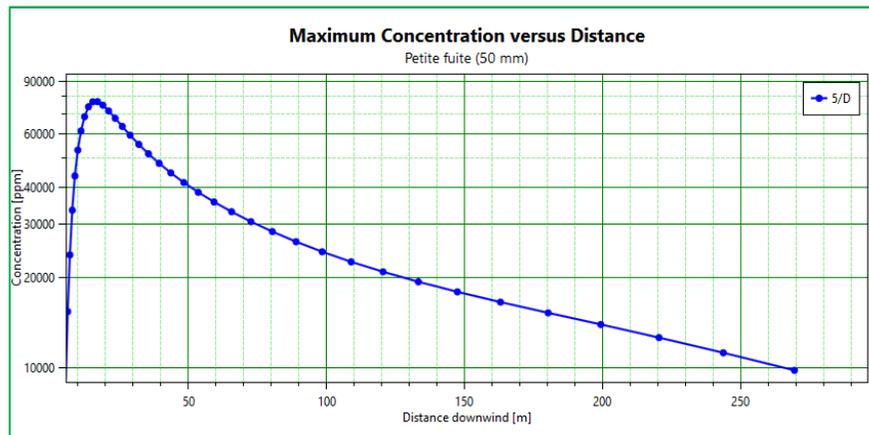


Figure III. 11: Concentration de nuage de gaz vs Distance (petite fuite)

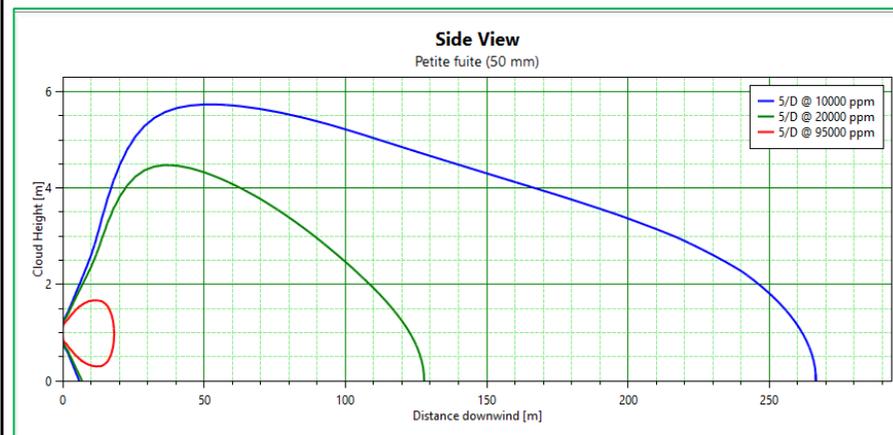


Figure III. 12: Hauteur de nuage de gaz par rapport le sol (petite fuite)

**Equipements :** Sphère de stockage 07-T-00XX

**Activité :** stockage de GPL

**Conditions opératoires :** 21 barg et 37°C

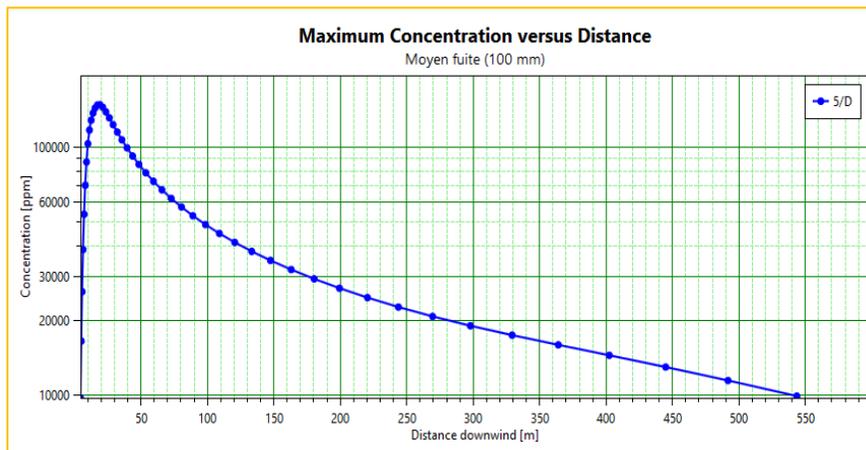
**Volume :** 500 m<sup>3</sup>



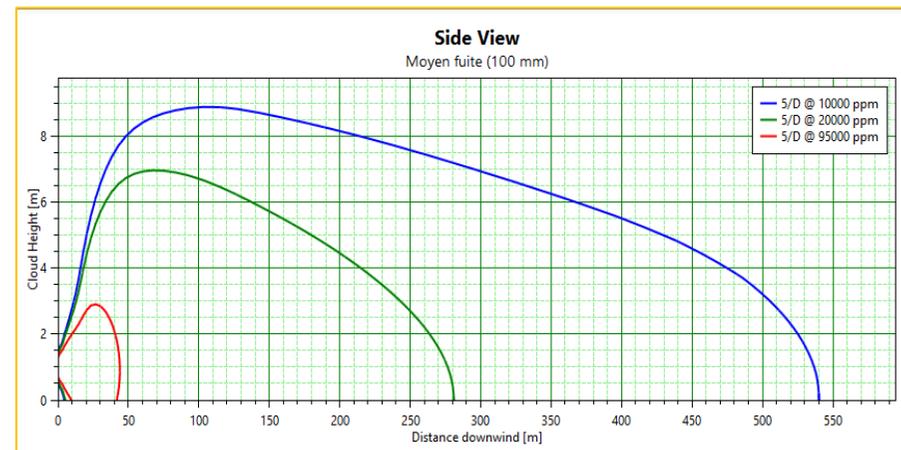
**Figure III. 13:** Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers le nord (moyenne fuite)



**Figure III. 14:** Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers l'ouest (moyenne fuite)



**Figure III. 15:** Concentration de nuage de gaz vs Distance (moyenne fuite)



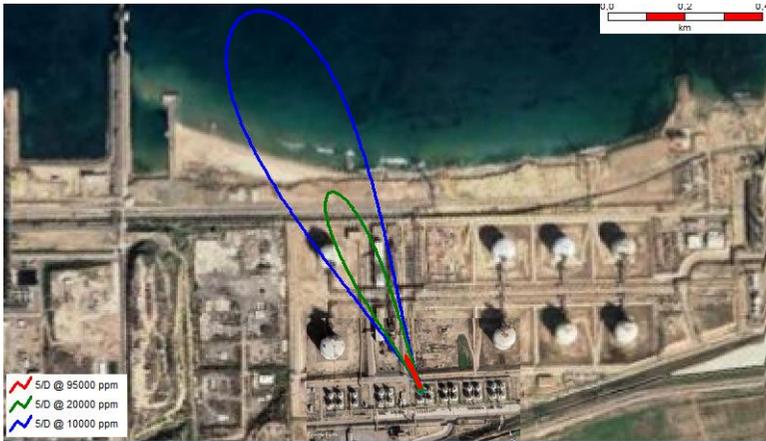
**Figure III. 16:** Hauteur de nuage de gaz par rapport le sol (moyenne fuite)

**Equipements :** Sphère de stockage 07-T-00XX

**Activité :** stockage de GPL

**Conditions opératoires :** 21 barg et 37°C

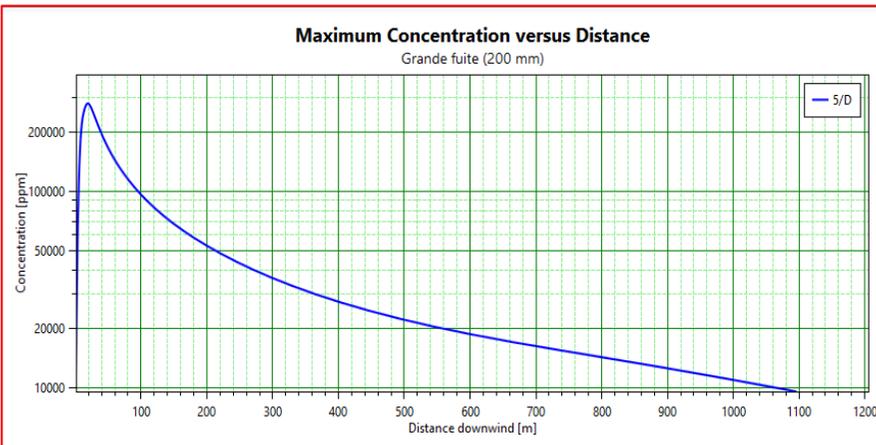
**Volume :** 500 m<sup>3</sup>



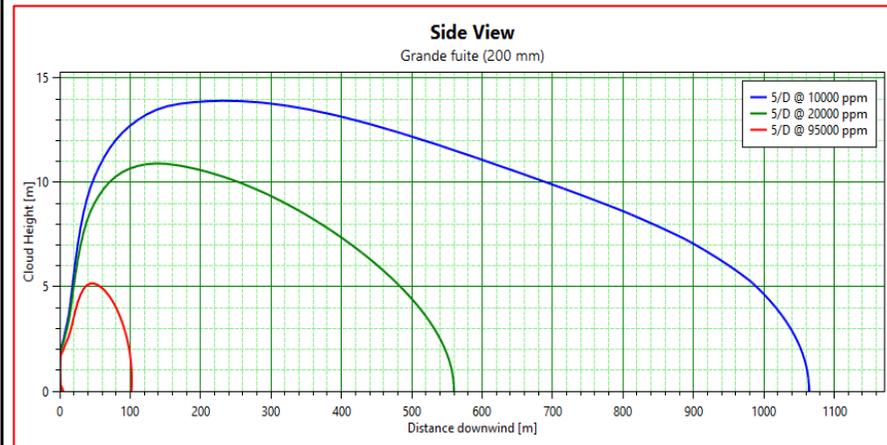
**Figure III. 17:** Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers le nord (grande fuite)



**Figure III. 18:** Dispersion de nuage de gaz direction du vent vers l'ouest ( grande fuite)



**Figure III. 19:** Concentration de nuage de gaz vs Distance (grande fuite)



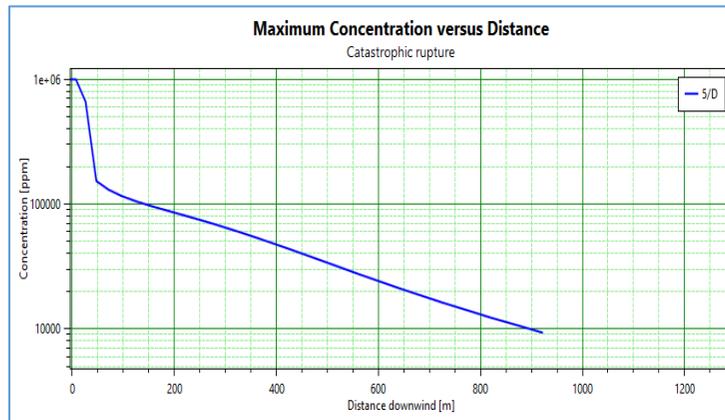
**Figure III. 20:** Hauteur de nuage de gaz par rapport le sol (grande fuite)

**Equipements :** Sphère de stockage 07-T-00XX

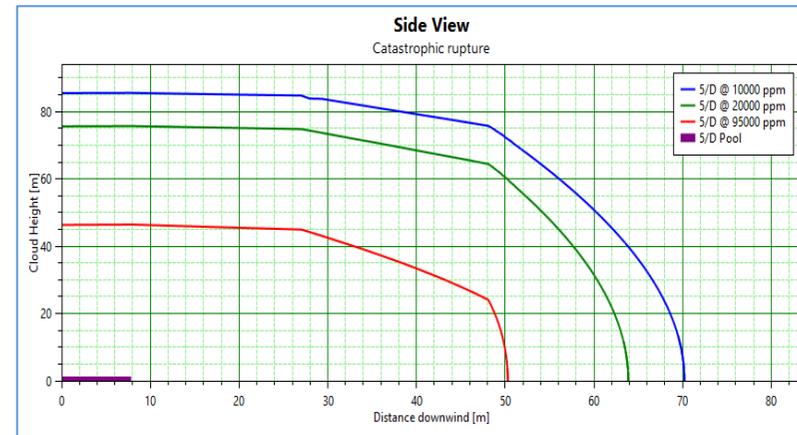
**Activité :** stockage de GPL

**Conditions opératoires :** 21 barg et 37°C

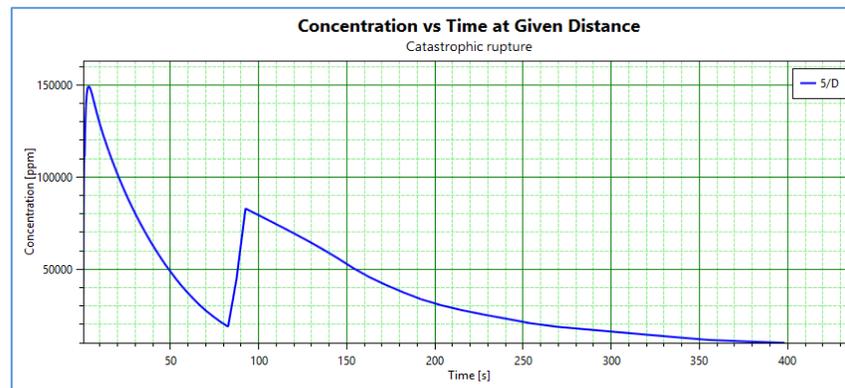
**Volume :** 500 m<sup>3</sup>



**Figure III. 21:** Concentration de nuage de gaz vs Distance (catastrophique rupture)



**Figure III. 22:** Panaches de dispersion de gaz (catastrophique rupture)



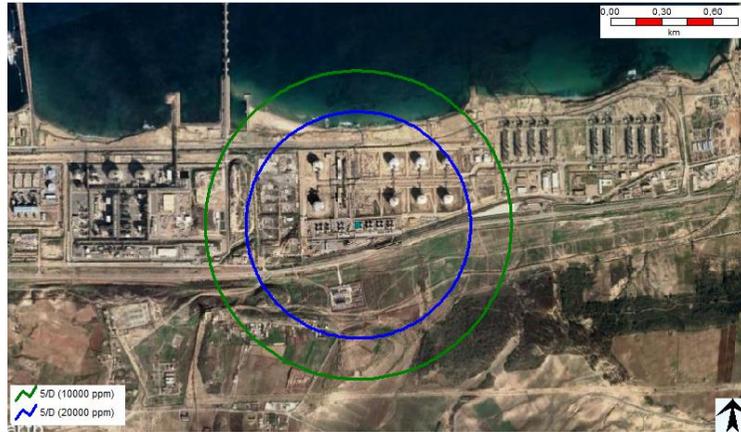
**Figure III. 23:** Concentration de nuage de gaz vs le temps à une distance de 50 m (catastrophique rupture)

**Equipements :** Sphère de stockage 07-T-00XX

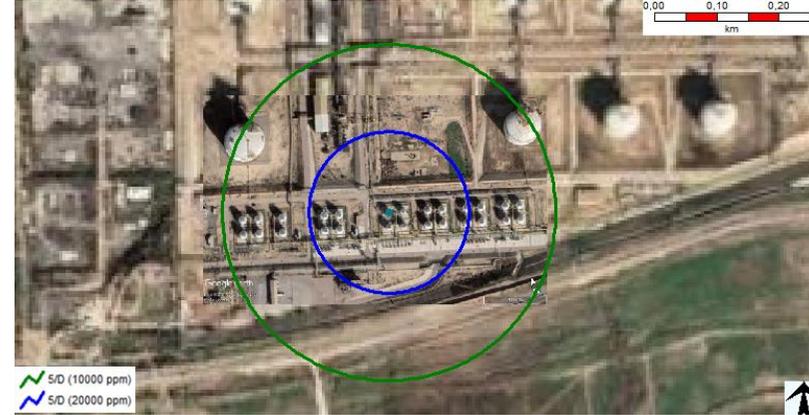
**Activité :** stockage de GPL

**Conditions opératoires :** 21 barg et 37°C

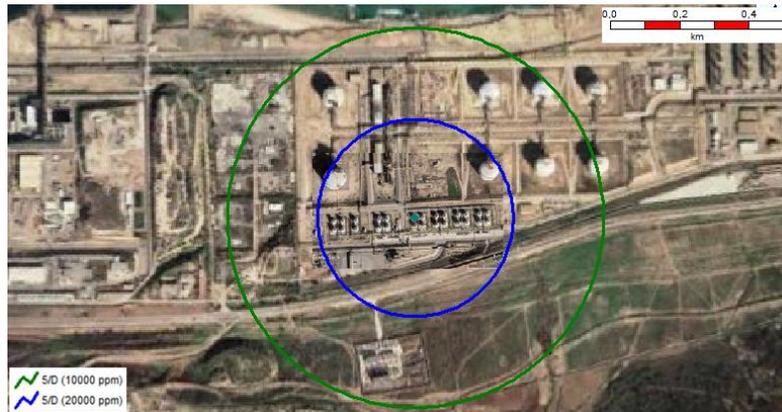
**Volume :** 500 m<sup>3</sup>



**Figure III. 24:** Flash fire suite à une rupture



**Figure III. 25:** Flash fire suite à une petite fuite



**Figure III. 26:** Flash fire suite à une moyenne fuite



**Figure III. 27:** Flash fire suite à une grande fuite

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

Tableau III. 4: Les résultats obtenue à partir des graphes

	Petite fuite (50 mm)	Moyenne fuite (100 mm)	Grande fuite (200 mm)	Catastrophique rupture
Concentration maximale (m)	76700	147700	278000	998000
Distance maximale (m)	266	540	1064	70
Hauteur maximale (m)	15	19	21	7
Débit massique dispersé (kg/s)	55,3803	221,521	886,085	//
Durée de déchargement (s)	3600	1062,97	265,743	//

Les figure en haut montrent clairement une dispersion significative du nuage pour les trois types de fuites alors que dans le cas d'une grande fuite,.

On constate que quel que soit l'importance de la fuite le nuage de gaz suit la direction du vent Les figures III. 8, 12, 16 représentent l'effet de vent sur la direction de la dispersion de nuage vers le nord dans les trois types de fuites, les effets de nuage dispersé dans l'atmosphère, associés au seuil de grande concentration (10000 ppm) dépassent les limites de maîtrise périmètre d'unité GP1/Z. Les effets atteignent des installations sensibles avec présence de personnel opérateur a voir le poste de chargement de GPL, les traines, le quai de navires, dans le cas d'une grande fuite, les conséquences peuvent provoquer des grands conséquences sur le côté économique car la gravité de danger est très importante tandis que le nuage passe jusqu'aux navires (grande surface touchée).

Les figures III. 10, 14, 18 montrent que suite au vent qui se dirige vers l'ouest y'a une influence sur la direction de nuage de gaz en se dirigeant vers les autres sphères de stockage de GPL, dans le cas de grande fuite la surface touchée dépasse les limites de maîtrise de complexe et expose d'autres unités de production comme GNL3.

La Figure III. 23 représente le résultat obtenu à une distance de 50 m à la source pour le scénario catastrophique rupture). On constate la rapidité d'augmentation de concentration de gaz à cette distance de source jusqu'à 150000 ppm durant trois secondes.

Les figures III. 25, 26, 27, 28 représente les distances des limites inférieure et supérieure d'explosibilité et la zone ATEX.

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

**Tableau III. 5:** les résultats obtenue à partir le rapport des scénarios

<b>Scénario</b>	<b>Distance de LSE (m)</b>	<b>Distance de LIE (m)</b>
Catastrophe rupture	159.6	657.4
Petite fuite (50mm)	N/A	127.8
Moyenne fuite (100mm)	41.9	280.7
Grande fuite (200mm)	102.5	559

## III.6. Modélisation du dispersion GPL par INFLUX de la sphère de stockage GPL 07-T-00XX :

### III.6.1. Etude de dispersion du nuage gazeux « propane » :

Pour un dégagement gazeux, la dispersion du propane dans des zones non confinées est nécessaire pour comprendre l'ampleur des concentrations de gaz combustible. Des profils de concentration de gaz sont nécessaires pour déterminer l'emplacement optimal du détecteur et la stratégie de placement.

Ainsi que l'étendue et / ou le taux d'accumulation d'une atmosphère inflammable est principalement affectée par les paramètres chimiques et physiques de la libération, dont certaines sont des propriétés intrinsèques du gaz inflammable « propane », d'autres sont spécifiques au processus ou l'emplacement. Par souci de simplicité, l'effet de chacun des paramètres ci-dessous suppose que les autres paramètres restent inchangés.

### III.6.2. Les paramètres du complexe GP1Z influant le comportement des rejets de gaz :

#### III.6.2.1. Limites d'inflammabilité

Domaine d'inflammabilité du propane : 2,2 à 9,5 % du volume dans l'air, plus la LIE comme fraction de volume de gaz inflammables dans l'air, plus grande sera la mesure et / ou le taux d'accumulation d'une atmosphère inflammable. Compte tenu des taux de libération identiques, les gaz avec des valeurs inférieures LIE atteindront leur concentration d'allumage plus rapidement que les gaz avec des valeurs élevées LIE.

#### III.6.2.2. Densité relative du gaz libérée

Densité relative, gaz (air=1) du propane : 1,5 par conséquent le propane s'accumuler au niveau du sol.

Remarque : Un mélange de gaz qui a une densité relative inférieure à 0,8 est considéré comme étant plus léger que l'air, il aura tendance à se déplacer vers le haut. Si la densité relative d'un mélange de gaz est supérieure à 1,2 il est considéré comme étant plus lourd que l'air. Il aura tendance à accumuler au niveau du sol.

L'étendue horizontale et/ou le taux d'accumulation d'une atmosphère inflammable au niveau du sol avec l'augmentation de la densité relative.

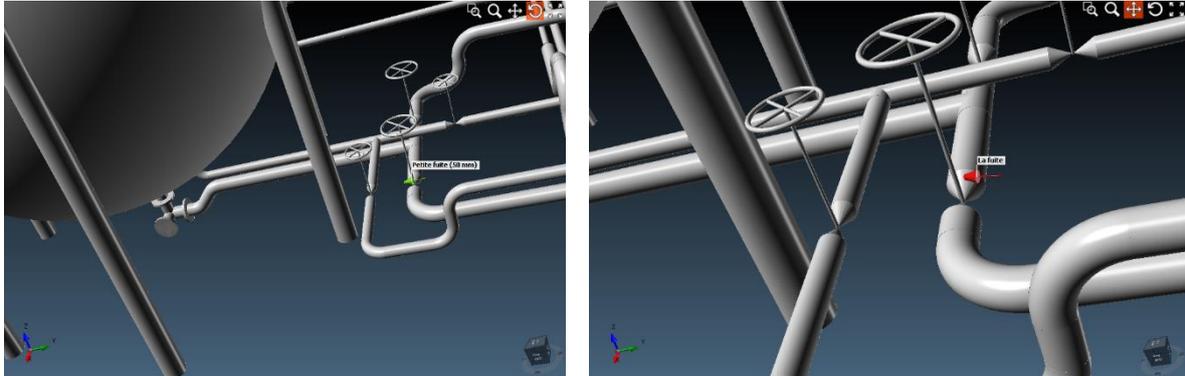
L'étendue verticale et / ou le taux d'accumulation d'une atmosphère inflammable au-dessus de la source augmente avec la diminution de la densité relative.

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

➤ **Taux de libération de gaz** : Plus le taux de libération est important plus la mesure et/ou le taux d'accumulation de l'atmosphère inflammable sera important. Le taux de libération dépend lui-même d'autres paramètres, à savoir :

- **La géométrie de la source de libération** : Ceci est lié aux caractéristiques physiques de la source de libération (une surface ouverte, la bride de fuite, fissuration sur un pipe...etc.)

Pour **notre étude** on a choisi une vanne qui se trouve à la sortie de la sphère ou est y a une probabilité d'une fuite selon le retour d'expérience (les rapports d'incident).



**Figure III. 28:** Localisation de fuites - sortie de sphère 07-T-00XX

➤ **La vitesse de libération** :

« La pression au niveau de la canalisation du 12 pouce (30.48 cm) sorti des sphères propane où elle se situe la vanne est 11,5 bar et le débit volumique = 3,457 m<sup>3</sup>/s pour une fuite de 20 mm ».

Remarque : le taux de libération augmente avec la vitesse de libération. Cette dernière est liée à la pression du procédé et à la géométrie de la source de libération par conséquent un taux de rejet important combiné à une grande vitesse génère un jet d'impulsion qui affectera le comportement du gaz libéré au moins au voisinage de la source. Pour notre cas la fuite est dans une conduite sous pression (vitesse élevée) donc le propane se comporte initialement comme un jet puis, la quantité du jet se désintègre jusqu'à ce que finalement la dispersion du gaz soit contrôlée par le débit d'air et des effets de flottabilité, puis par diffusion gazeuse.

- **La volatilité d'un liquide inflammable** : Cela est lié principalement à la pression de vapeur et la chaleur de vaporisation. Si la pression de vapeur n'est pas connue, le point d'ébullition et le point d'éclair peut être utilisé comme un guide.

- **Pression de vapeur, 20°C** : 8,3 bar

- **Point d'ébullition** : -42,1 °C

Remarque : Une atmosphère explosive ne peut pas exister si le point d'éclair est nettement supérieur à la température maximale correspondante du liquide inflammable. Plus le point

## Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz

d'éclair, plus l'étendue et / ou le taux d'accumulation d'une atmosphère inflammable sera important.

➤ **Température du liquide** : Selon le manuel opératoire de la section stockage ambiant et l'équipe du DCS la température du propane varié en fonction du climat extérieure (hiver. Été) et pour notre cas on a choisi une température de « 35 °C »

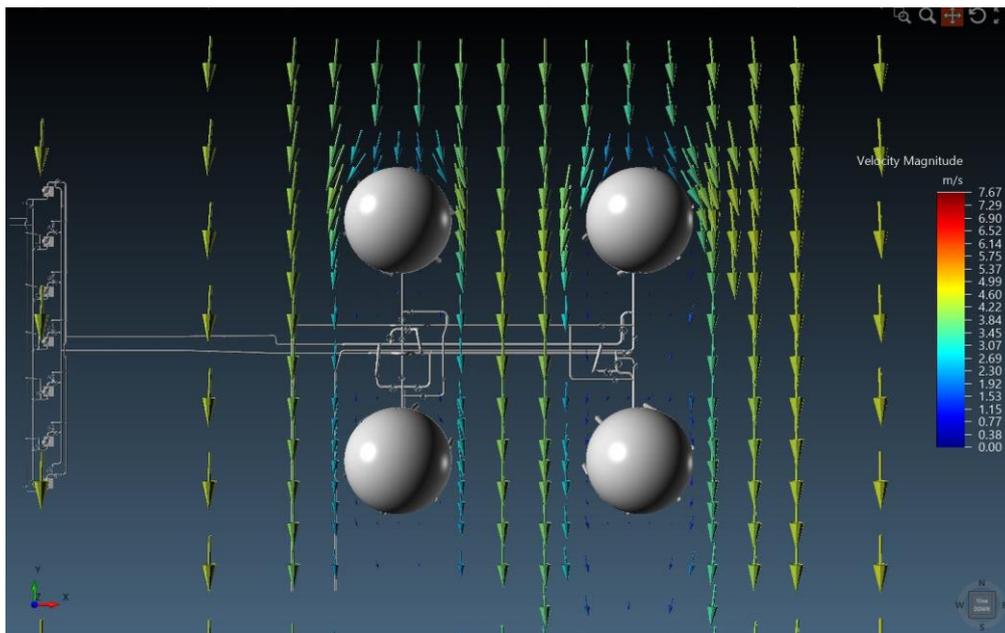
➤ **La température environnante à la source de libération** :

En se référant au donné métrologique et l'EDD on a choisi une température ambiante de « 37 °C » comme nous avons choisi avant aux études précédentes (HAZOP & PHAST) et pour la pression du propane elle est de « 21 bar » selon le process donc une différence significativement par apport à la pression ambiante par conséquent la densité absolue de la libération sera affectée, et donc son comportement, au moins au voisinage de la source.

### III.6.3. Modélisation de la dispersion :

La modélisation du nuage en 3D est obtenue à partir de In : Flux qui permet d'avoir une étude de dispersion avec la prise en charge de la direction du vent et la géométries complexes dans un environnement.

**Résultat de la direction du vent avec obstacle :**



**Figure III. 29:** direction du vent vers le Sud

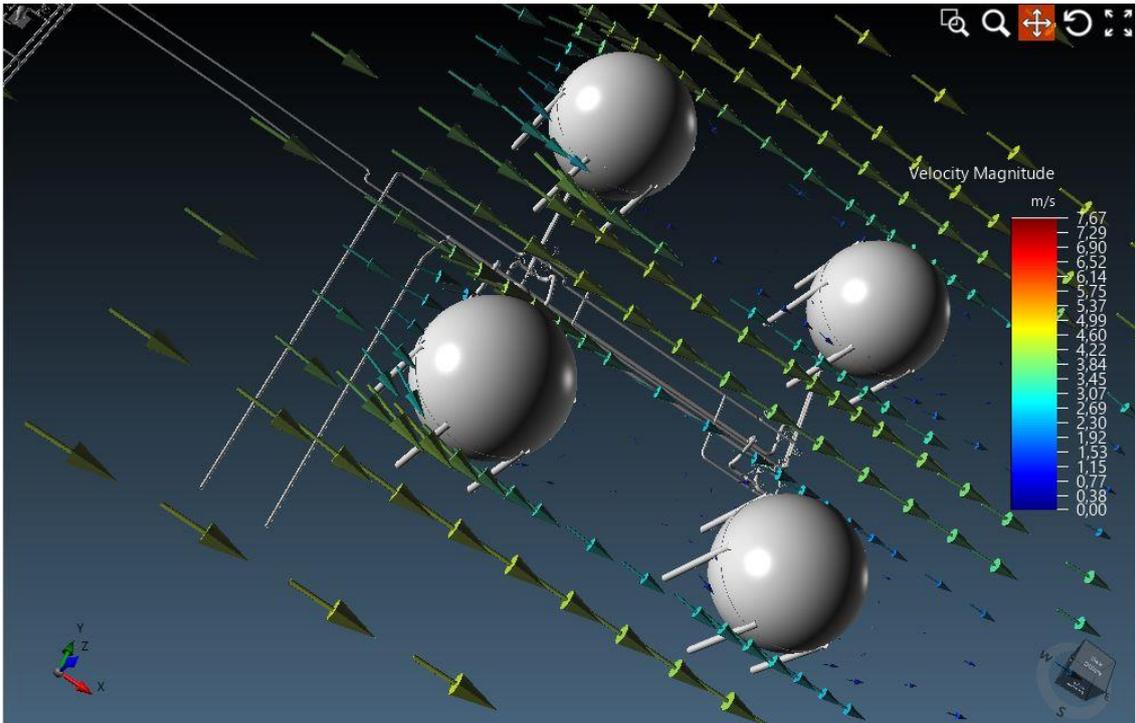


Figure III. 30: direction du vent vers l'East

Près d'un obstacle, tel qu'une sphère, le vent est influencé par le fortement et change sa direction autour de l'obstacle. La vitesse du vent atteind 2,30 m/s face à la paroi de la sphère,. L'exploitation de celles-ci nécessite de prendre en compte les différents obstacles du site.

**Résultat de la dispersion du propane :**

**Modélisation XY :**

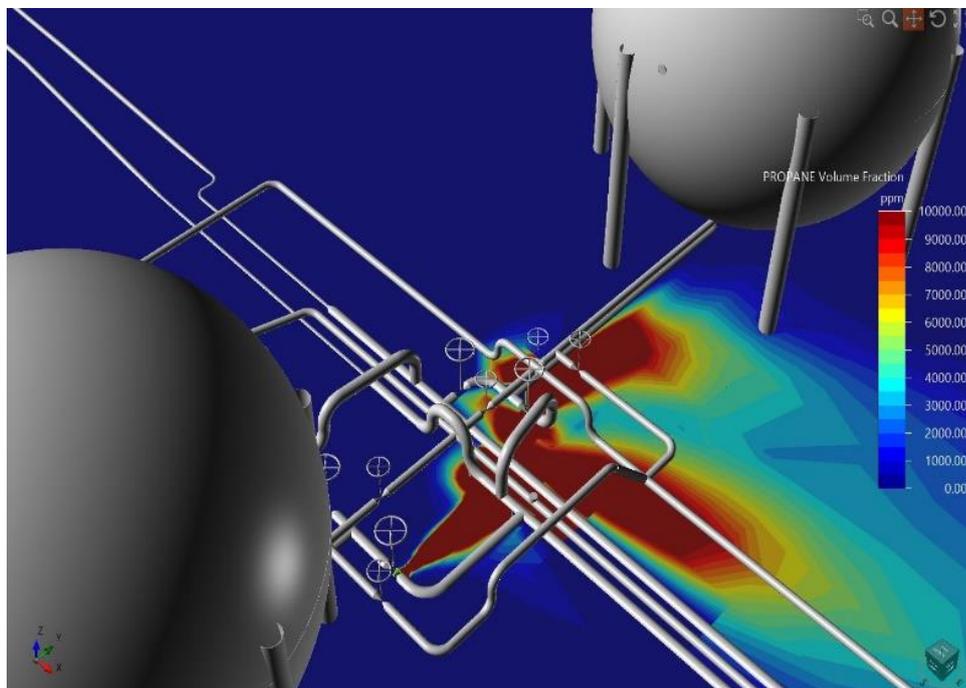
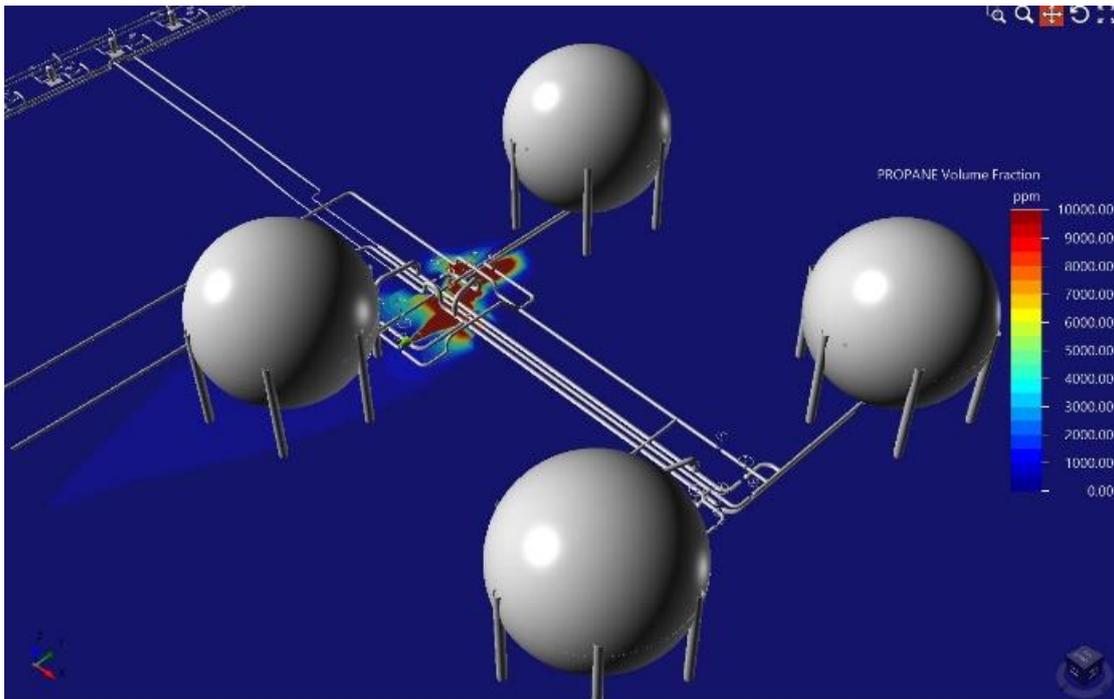
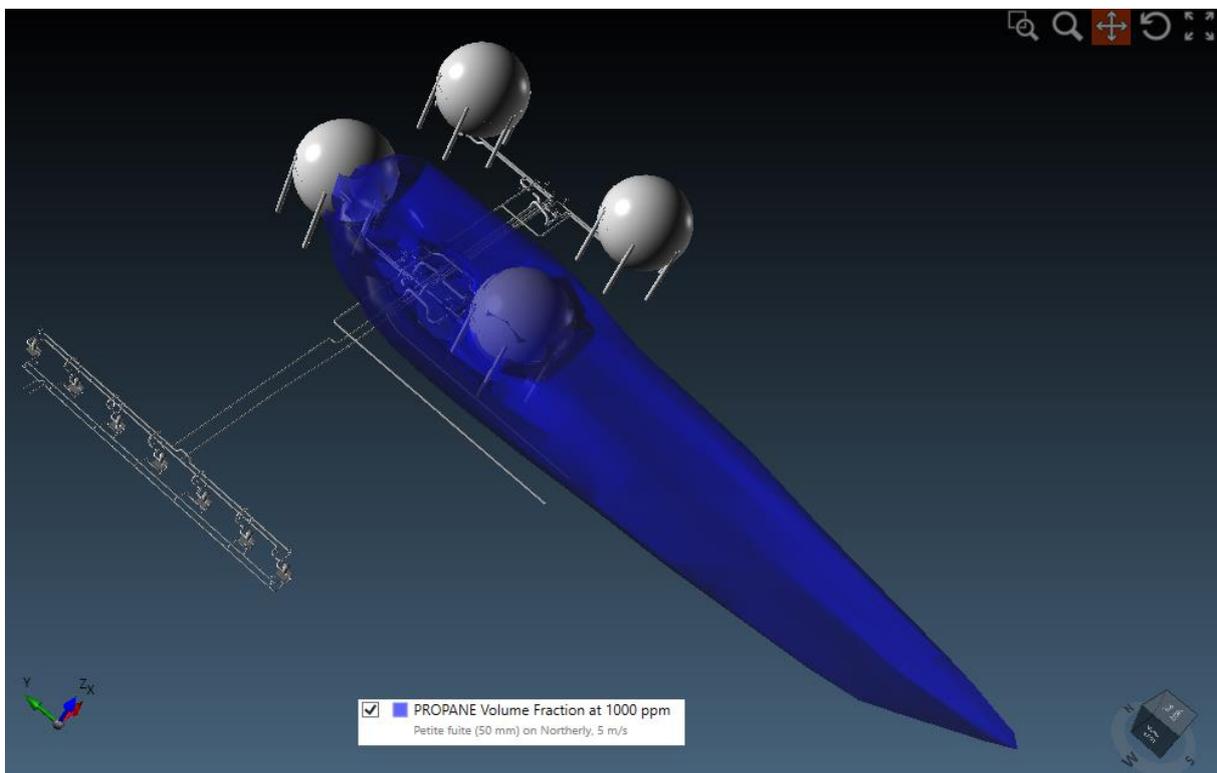


Figure III. 31: vue sur l'emplacement d'une petite fuite

### Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz



**Figure III. 32:** Dispersion de nuage de gaz due à une petite fuite vers le Sud selon les concentrations



**Figure III. 33:** vue en 3D sur la propagation du nuage de gaz due a une petite fuite vers le Sud

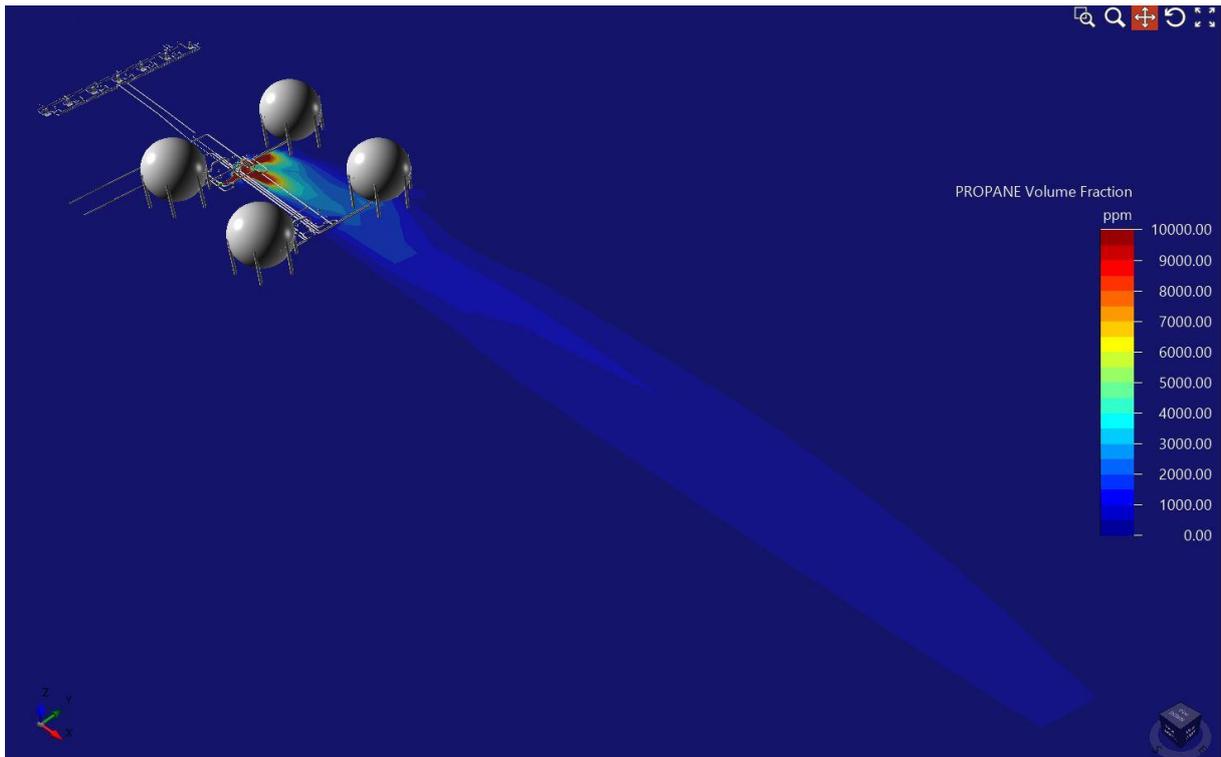


Figure III. 34: Dispersion de nuage de gaz due à une petite fuite vers l'Est selon les concentration

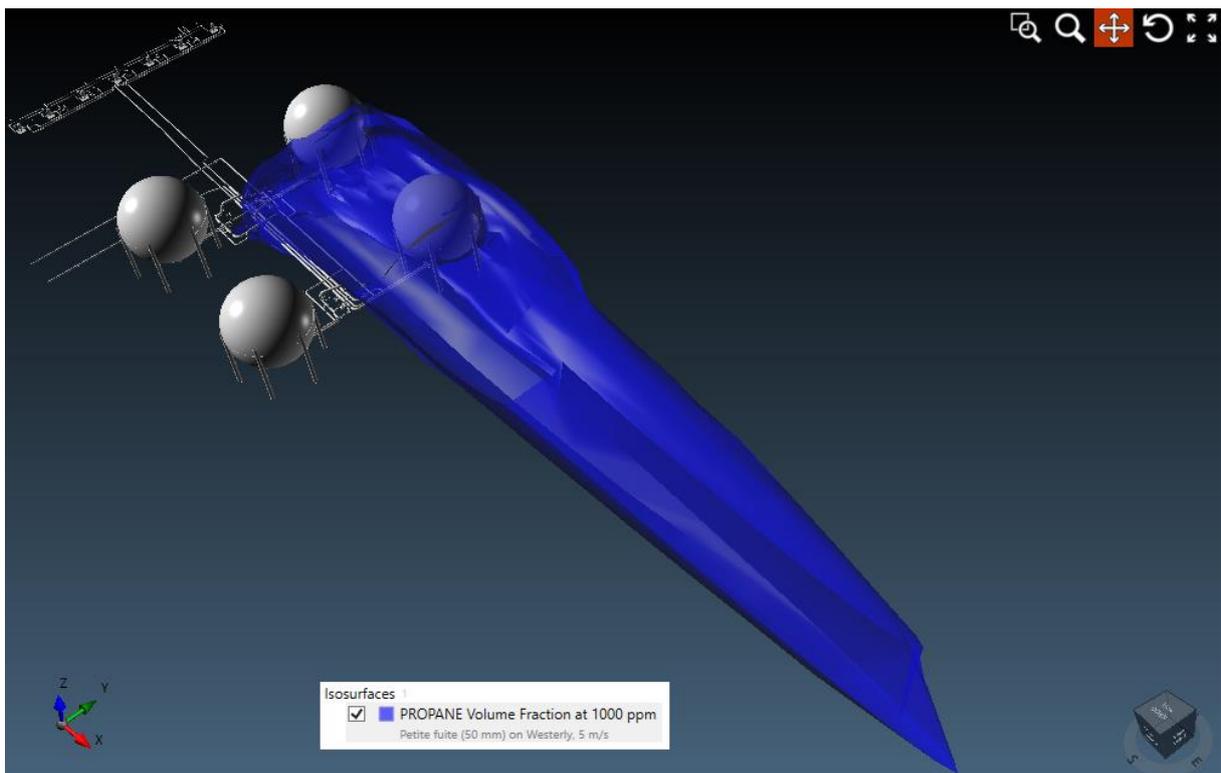
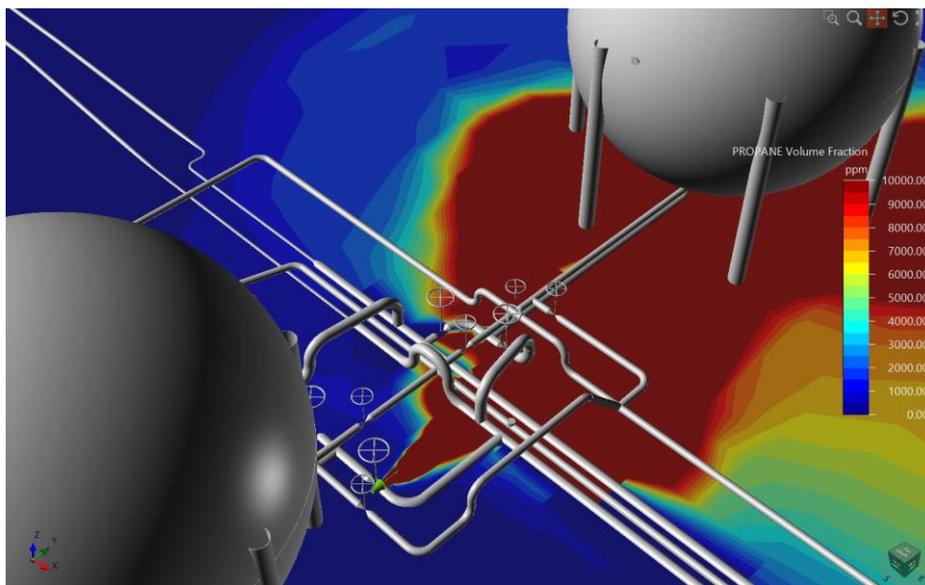


Figure III. 35: vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une petite fuite vers l'Est

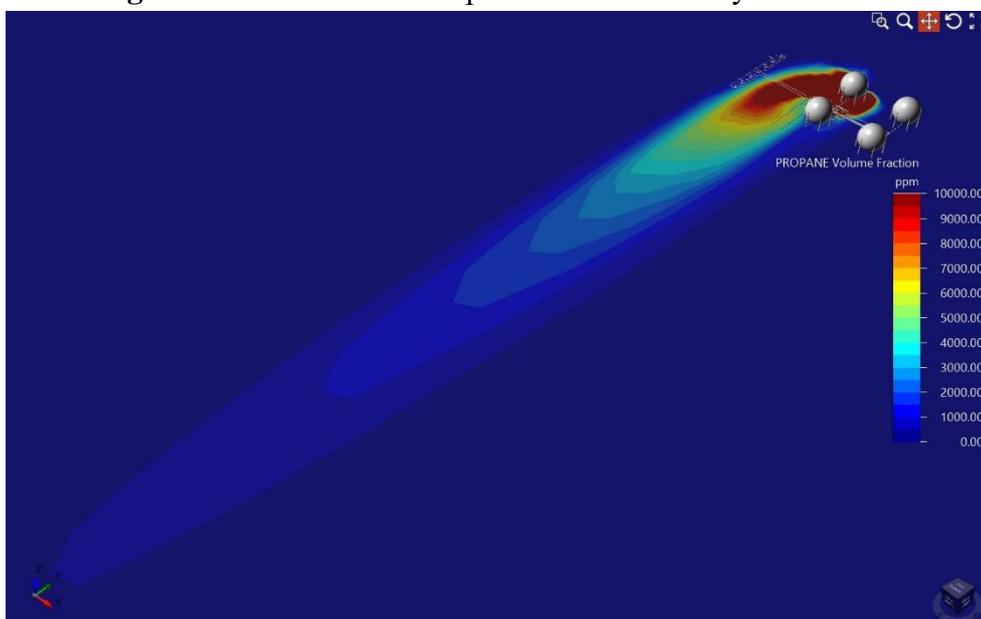
**Petite fuite :**

Suite à une petite fuite on constate que la grande concentration de nuage de gaz n'atteint pas de grandes distances et en générale ça reste au niveau des tuyauteries et l'installation de la sphère, comme étant la petite fuite est fréquente, il est important de prévoir des détecteurs de gaz près de ces installations, que ce soit ponctuelle ou bien linéaire, par contre la concentration en de dessous de 1000 ppm elle atteindre des distances considérables.

Dans le cas où la direction de vent est vers le Sud on constate que la sphère est comme étant un obstacle qui vas faire barrières à la propagation de nuage de gaz. La zone touchée que ce soit pour le Sud ou l'Est ya pas un grand risque.



**Figure III. 36:** vue sur l'emplacement d'une moyenne fuite



**Figure III. 37:** Dispersion de nuage de gaz due à une moyenne fuite vers le Sud selon les concentrations

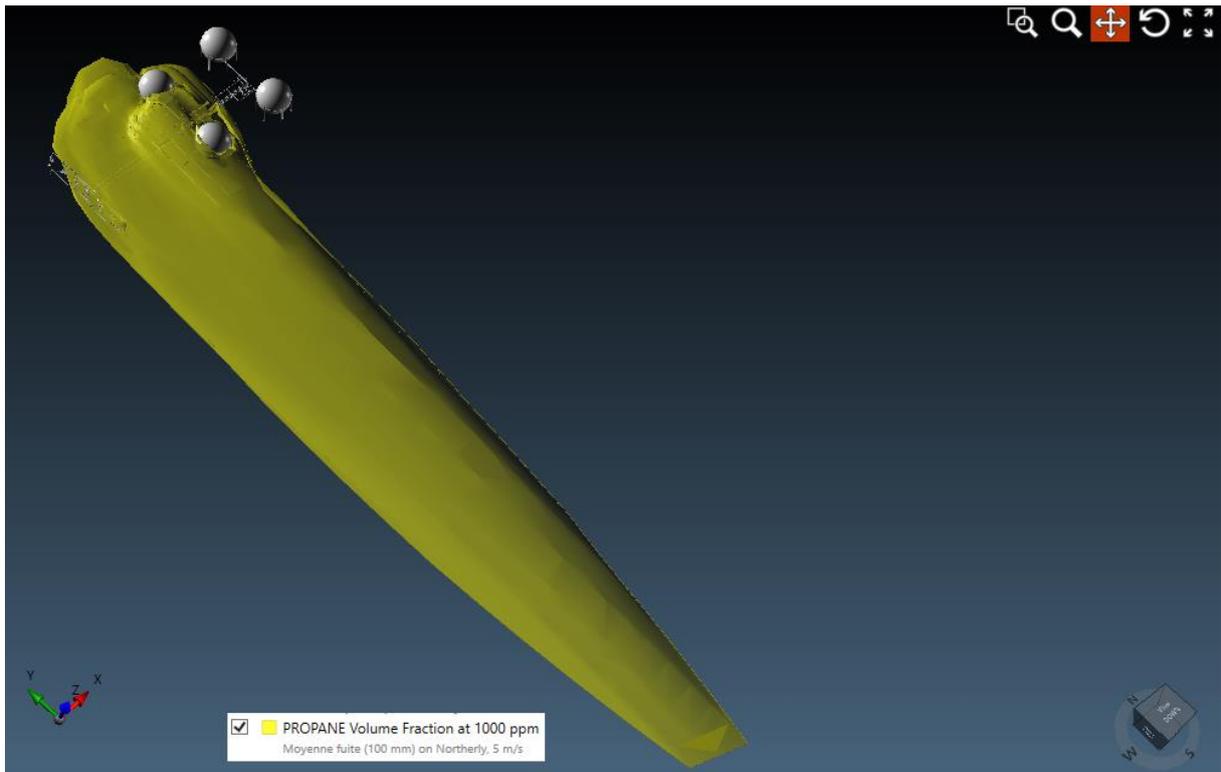


Figure III. 38: vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une moyenne fuite vers le Sud

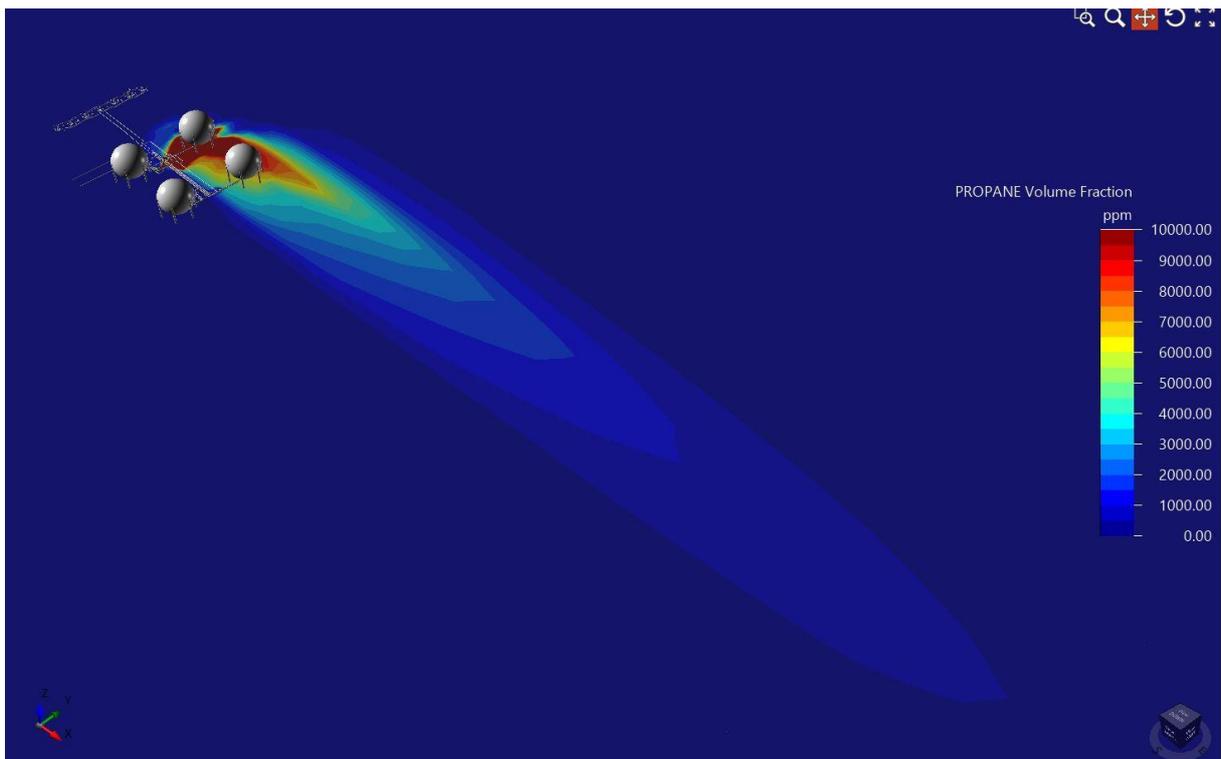
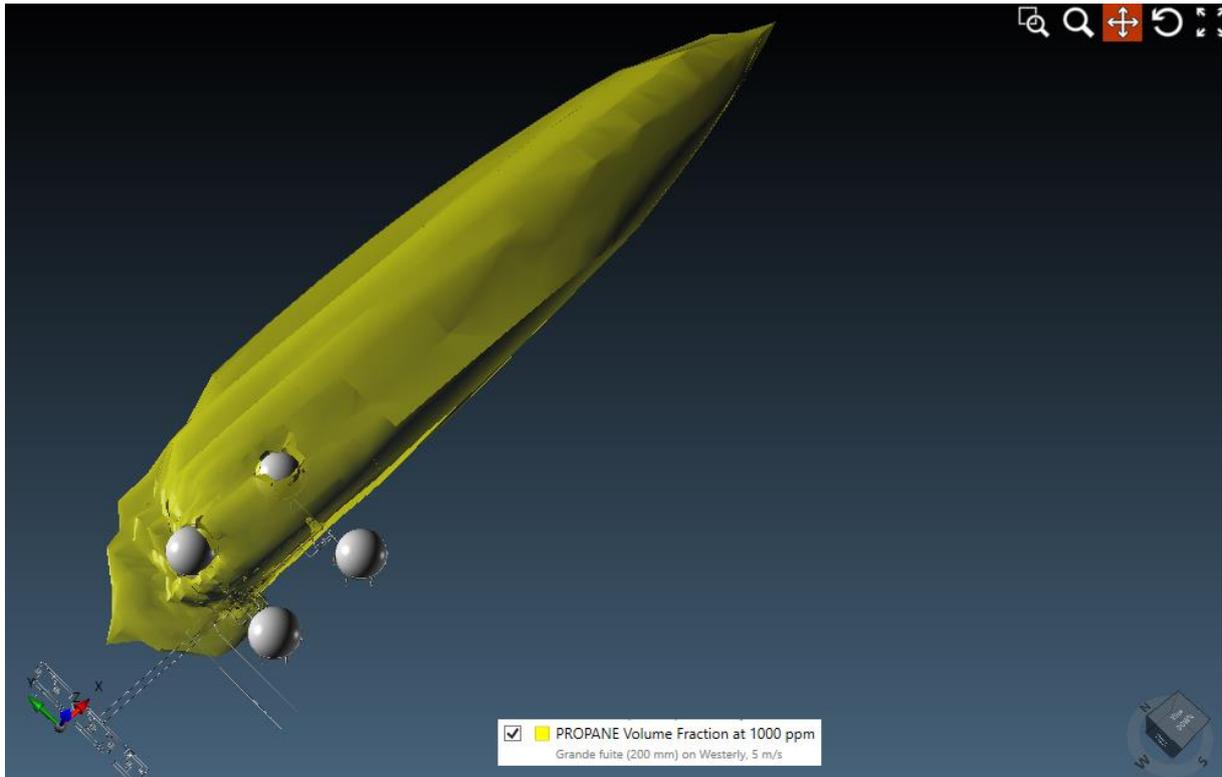


Figure III. 39: Dispersion de nuage de gaz due à une moyenne fuite vers l'Est selon les concentrations



**Figure III. 40:** vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une moyenne fuite vers l'Est

**Moyenne fuite :**

Dans le cas d'une moyenne fuite on constate qu'une grande concentration dépasse la distance de la sphère et atteindre l'autre sphère en face, par contre la concentration en dessous de 1000 ppm elle atteindre une grande distance qui est considérable par rapport aux petites fuites. Dans le cas où la direction de vent que ce soit vers le Sud ou l'Est la propagation de nuage de gaz atteindre les mémés distance.

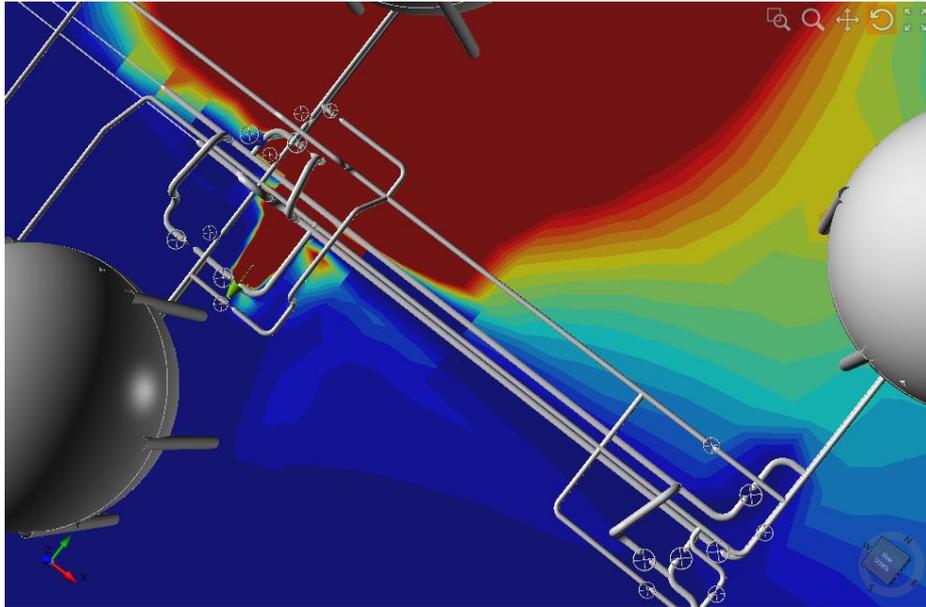


Figure III. 41: vue sur l'emplacement d'une grande fuite

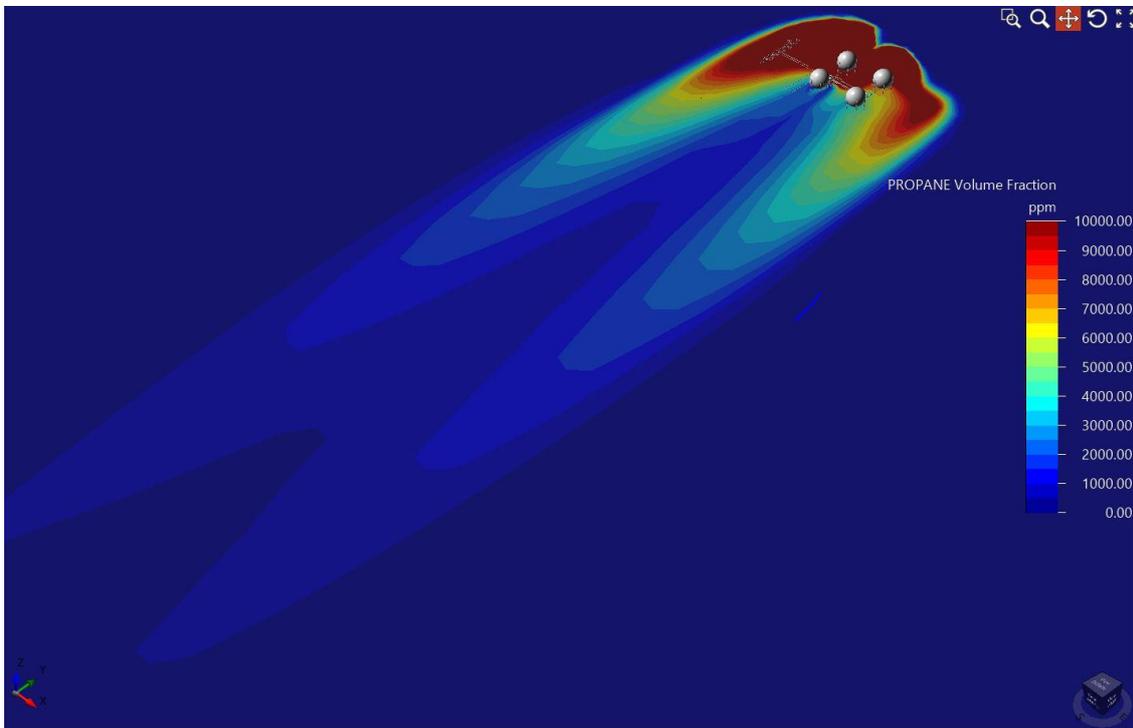


Figure III. 42: Dispersion de nuage de gaz due à une grande fuite vers le Sud selon les concentrations



Figure III. 43: vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une grande fuite vers le Sud \* (capture 3D)

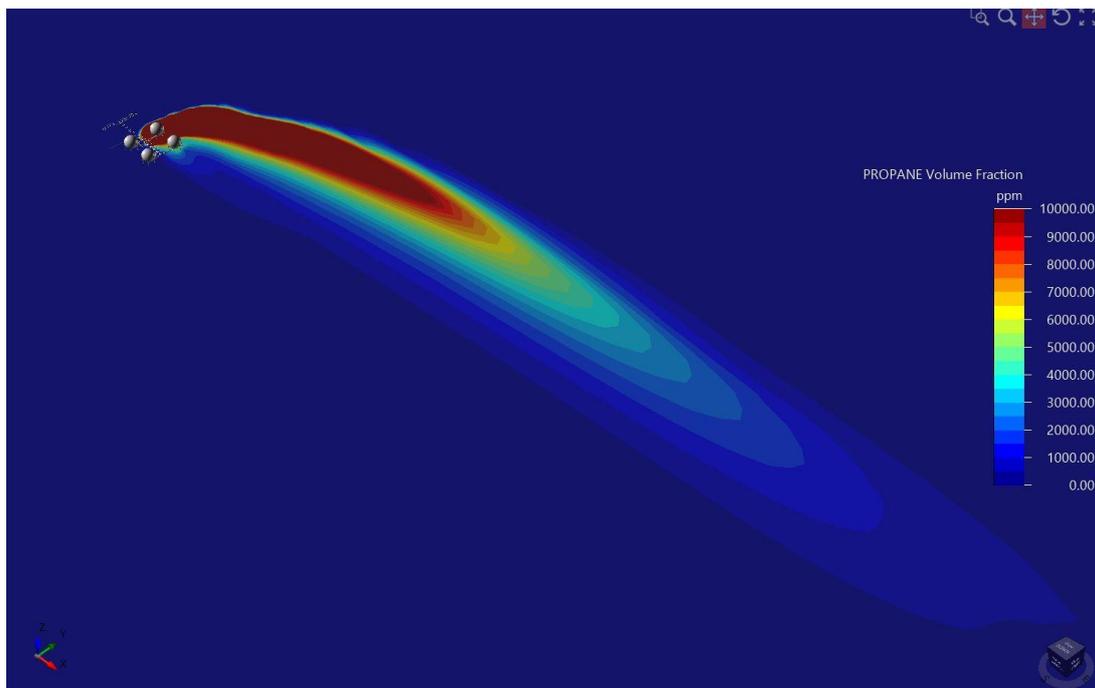
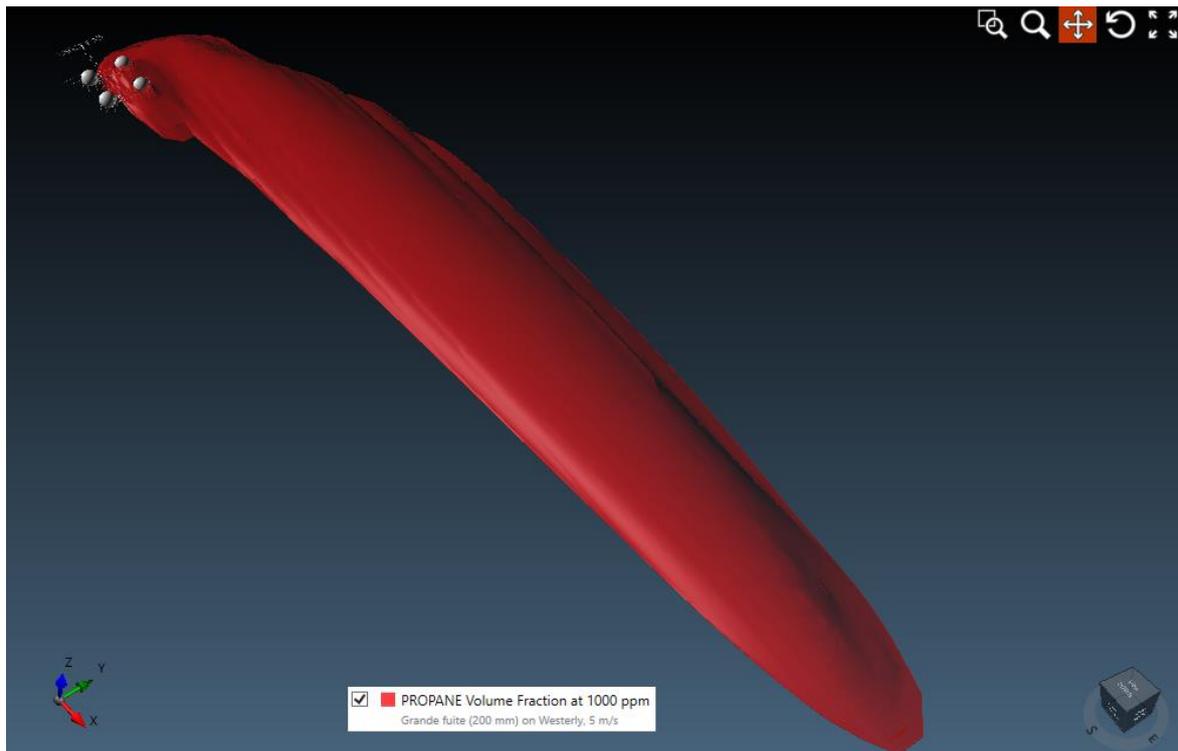


Figure III. 44: Dispersion de nuage de gaz due à une grande fuite vers l'Est selon les concentrations



**Figure III. 45:** vue en 3D sur la propagation de nuage de gaz due à une grande fuite vers l'Est  
\* (capture 3D)

**Grande fuite :**

Dans le cas d'une grande fuite on voit que les grandes concentrations de nuage de gaz est tellement grande elle atteint les autres sphères ainsi que les installations avoisinantes de la sphère et ça est due à la raison que la grande pression ainsi que quantité de gaz (fuite de 200mm). Dans le cas où la direction de vent est vers le sud (cas contraire de la direction de la fuite) la concentration se disperse en deux parties grâce à la présence d'obstacles qui sont les deux sphères qui vont faire barrières à la propagation de nuage de gaz, Par contre dans le cas de direction de vent est vers l'Est les concentrations atteignent une très grande surface selon un seul flux en raison d'absence d'obstacles.

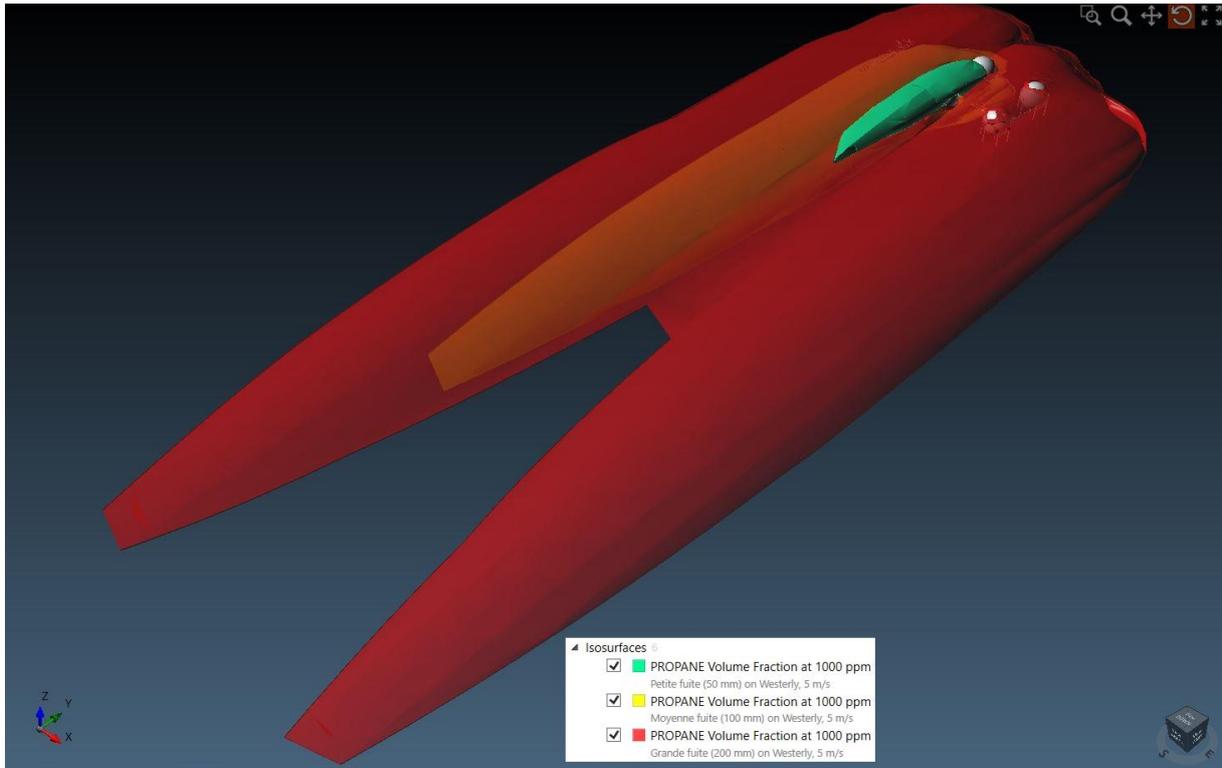


Figure III. 46: vue de face de la propagation de nuage de gaz vers le Sud due au trois types de fuite

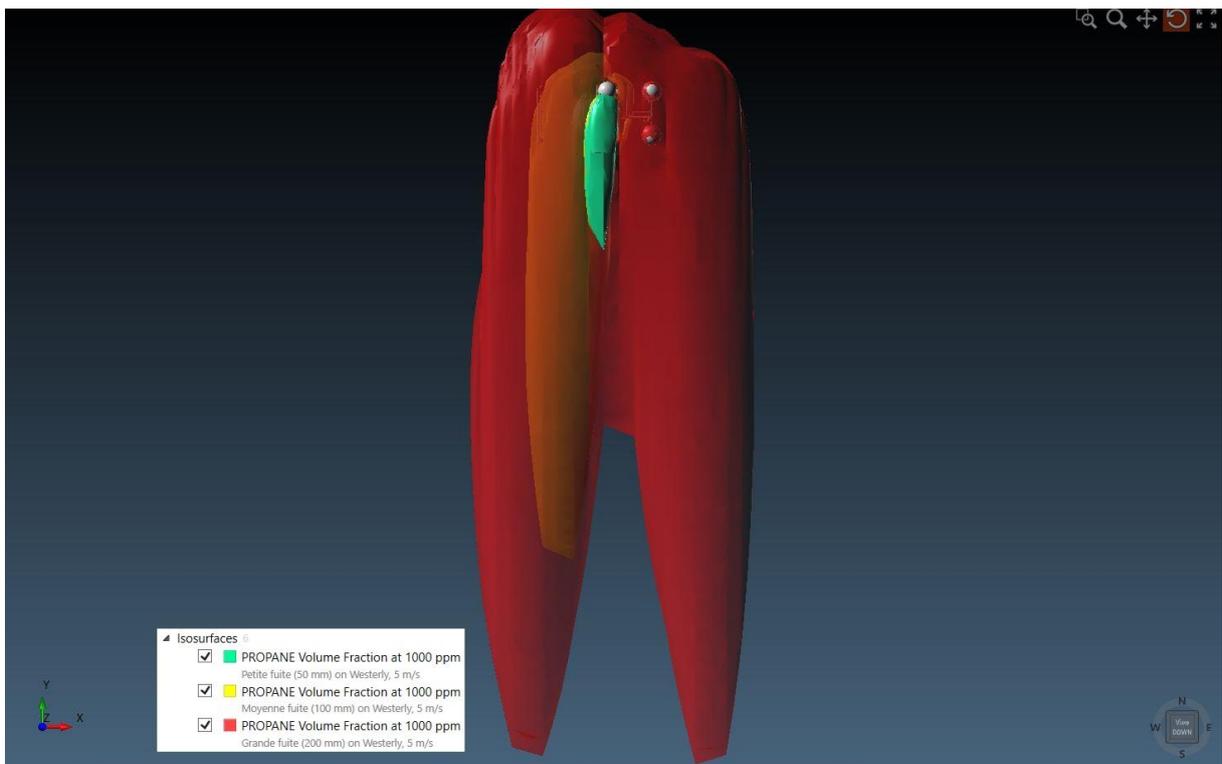


Figure III. 47: vue d'en haut de la propagation de nuage de gaz vers le Sud due au trois types de fuite

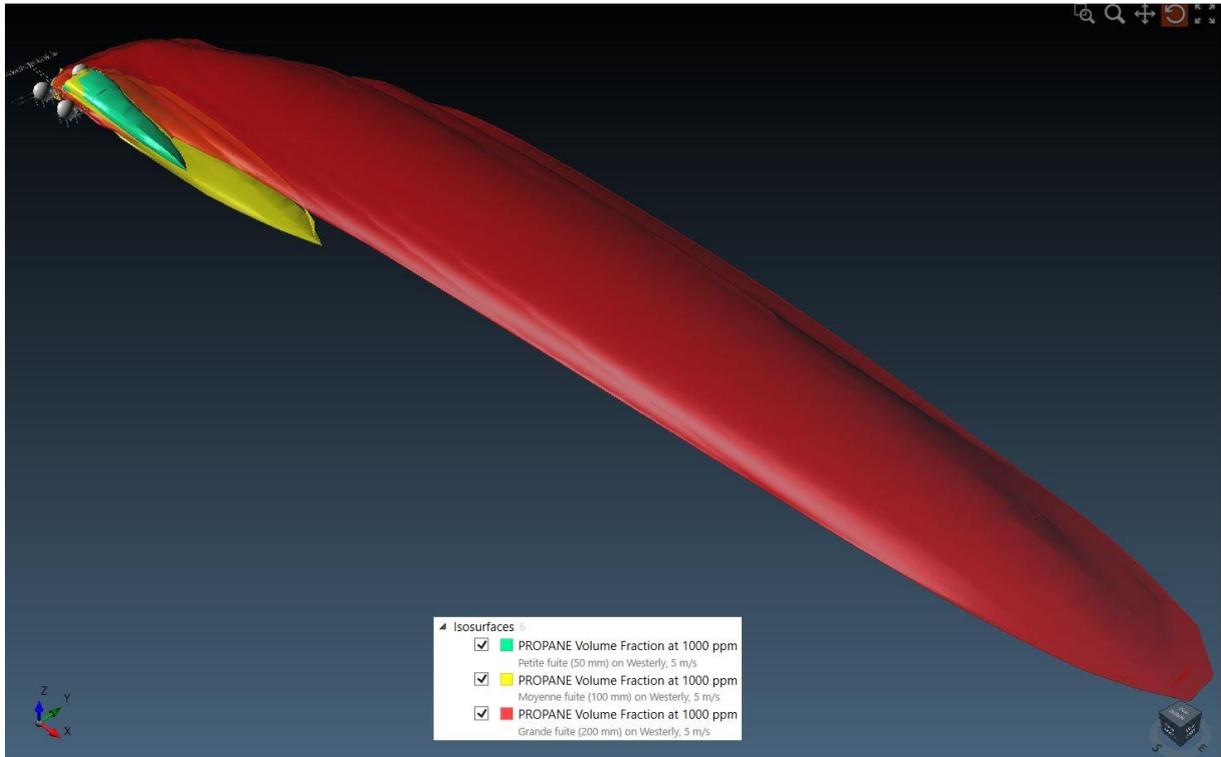


Figure III. 48: vue de face de la propagation de nuage de gaz vers l'Est due au trois types de fuite

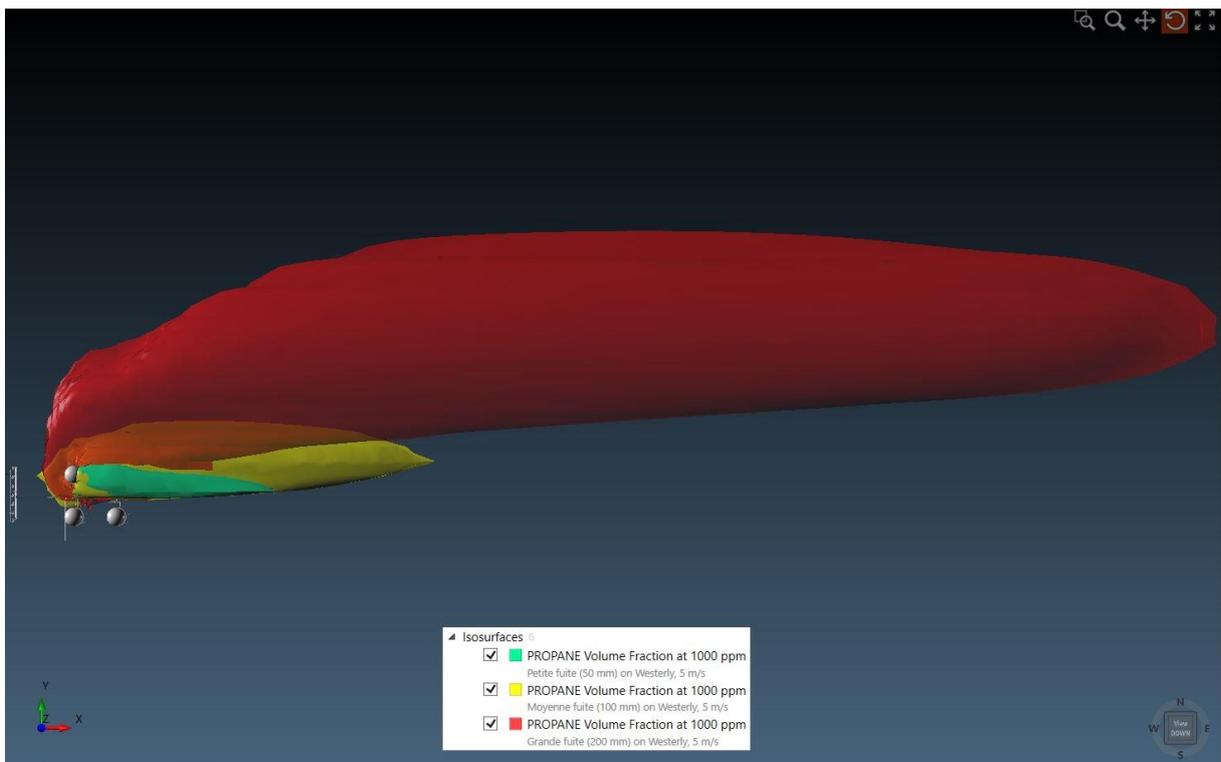


Figure III. 49: vue d'en haut de la propagation de nuage de gaz vers l'Est due au trois types de fuite

### **Chapitre III : Etude et Modélisation de la dispersion du nuage de gaz**

Les figures de III -47 jusqu'à III -50 représente une comparaison entre les 3 types de fuite avec la même concentration 1000 ppm, on voit que la grande fuite se propage vers des grandes distances par rapport a moyenne et petite fuite on constate aussi qu'après la visualisation de vue en haut que les nuages de gaz restent au-dessous des sphères d'où le GPL est plus dense que l'aire.

#### **III.7. Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis d'établir une étude détaillée sur les scénarios catastrophiques au niveau des sphères de stockage de GP1Z par la méthode HAZOP ou les fuites était considéré comme critique comme étant le phénomène le plus redouté permettant la survenu de plusieurs scénarios catastrophiques avec impact sur l'être humain les installation et l'environnement.

Par la suite ces fuites-là, ont étaient simuler par le logiciel Phast pour étudier les concentrations, les distances et les hauteurs peuvent être attient par la propagation du nuage de gaz selon plusieurs brèches et sur différentes conditions météorologiques.

A la fin une modélisation CFD par le logiciel INFLUX nous a permet de mieux comprendre l'évolution du nuage de gaz inflammable pour mieux établir le système de détection.

## **Conclusion générale :**

Durant ce projet de fin d'étude qui est la modélisation 3D de la dispersion de gaz par CFD on est arrivé à ce que les conséquences sur la sécurité du personnel, installation, environnement et les effets économiques potentiels suite à une libération de gaz inflammable non détectée devraient être une préoccupation majeure. Cela nous a muni vers l'élaboration d'une étude bibliographique pour mieux comprendre les scénarios catastrophiques qui peuvent être engendré ainsi que les méthodes d'analyse des risques pour proposer les meilleures solutions pour la maîtrise de ces scénarios, ainsi que la CFD pour la modélisation de la propagation du nuage de gaz par la loi de dispersion tridimensionnelles.

L'application de cette apport théorique nous a permet d'appliqué tous ces connaissances sur les sphères de stockage de GPL du complexe GPIZ afin de mettre en évidence le scénario de dispersion de gaz par plusieurs approche talque l'analyse par HAZOP simulation par Phast et modélisation par INFLUX ainsi permettant de mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection pour limités les scénarios catastrophiques.

Cela devrait conduire a renforcé l'intégrité du système détection en ajoutons d'autre détecteur de gaz selon les résultats de la modélisation. Pour que le système de détection de gaz fixe devrait être en mesure de donner une alerte précoce de la présence et l'emplacement d'une accumulation de gaz inflammable, afin d'initier une ou plusieurs des actions suivantes :

- ✓ Évacuation des locaux.
- ✓ Lutte contre les incendies et/ou une dispersion du gaz appropriés et d'autres procédures d'urgence.
- ✓ Arrêt du processus ou de l'installation.

Toutefois, les performances ne peuvent à elles seules garantir que l'utilisation de ce type d'équipement permettra de protéger correctement la vie ou les biens en présence de gaz inflammables. Le niveau de sécurité obtenu dépend fortement de la sélection de l'installation, du calibrage et de la maintenance périodiques de l'équipement, associés à la connaissance des limitations de la technique de détection requise.

D'autre facteurs importants qu'il faut prendre en compte est l'intégration d'un PLC « automate programmable dédié à la sécurité » au système détection pour que l'action de sécurité s'effectue dans un bref délai et avec une fiabilité importante.

Au final l'intégration d'une conscience du devoir et la prise des responsabilités sont primordiales pour le bon fonctionnement du complexe et l'intégrité de l'installation.

## Bibliographie :

- [1] A. Desroches, A. Leroy, et F. Vallée, *La gestion des risques: principes et pratiques*. 2015.
- [2] A. DESROCHES, « Analyse globale des risques (AGR) : Concepts préliminaires | Techniques de l'Ingénieur ». <https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/methodes-d-analyse-des-risques-42155210/analyse-globale-des-risques-agr-se4015/concepts-preliminaires-se4015niv10001.html> (consulté le mai 17, 2021).
- [3] *Analyse globale des risques: principes et pratiques*. 2016.
- [4] « ISO élaboré par l'organisation internationale de normalisation", ». 2002.
- [5] O. IDDIR, « Études des dangers : mesures de maîtrise des risques (barrières) : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur ». [https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/fiche-pratique/environnement-securite-th5/maitriser-le-risque-chimique-management-sante-et-securite-dans-l-entreprise-dt118/etudes-des-dangers-mesures-de-maitrise-des-risques-barrieres-0543/#corps-article\\_context](https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/fiche-pratique/environnement-securite-th5/maitriser-le-risque-chimique-management-sante-et-securite-dans-l-entreprise-dt118/etudes-des-dangers-mesures-de-maitrise-des-risques-barrieres-0543/#corps-article_context) (consulté le mai 19, 2021).
- [6] Casso et associés et S. Hameury, *Réglementation et mise en sécurité incendie des ERP: dispositions générales, dispositions particulières*. Marne-la-Vallée: CSTB éditions, 2019.
- [7] J.-L. GUSTIN, « Management des risques chimiques - Explosion de gaz : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur ». <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-operations-unitaires-genie-de-la-reaction-chimique-tiajb/archive-1/management-des-risques-chimiques-j3894/> (consulté le mai 17, 2021).
- [8] O. IDDIR, « BLEVE – Causes et mesures de prévention », *Techniques de l'ingénieur Risques d'explosion*, vol. base documentaire : TIB157DUO., n° ref. article : se5058. Editions T.I., 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/risques-d-explosion-42157210/bleve-causes-et-mesures-de-prevention-se5058/>
- [9] « Guide méthodologique UFIP pour la réalisation des études de dangers en raffineries, stockages et dépôts de produits liquides et liquéfiés ». Union française des industries pétrolières.
- [10] J.-L. SEVEQUE, « Étude de dangers des ICPE - Analyse des scénarios », *Ref: TIP800WEB* - « Environnement », avr. 10, 2006. <http://www.techniques.ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/icpe->

reglementation-integree-42439210/etude-de-dangers-des-icpe-g4211/ (consulté le avr. 10, 2021).

- [11] J. SUAREZ, L. POURTIER, et O. LLONGARIO, « Modélisation de la dispersion atmosphérique des odeurs : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur ». <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-environnement-tiag0/archive-1/modelisation-de-la-dispersion-atmospherique-des-odeurs-g2960/> (consulté le mai 17, 2021).
- [12] « EN 1127-1:1997 - Explosive atmospheres - Explosion prevention and protection ». Consulté le: juin 08, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/3d1b85f9-6984-4048-b522-1ce4d46fc66e/en-1127-1-1997>
- [13] « BS EN 1127-2:2014 - Explosive atmospheres. Explosion prevention and protection. Basic concepts and methodology for mining ». Consulté le: juin 08, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030270981>
- [14] « ISO 13702:1999, Industries du pétrole et du gaz naturel — Contrôle et atténuation des feux et des explosions dans les installations en mer — Exigences et lignes directrices ». Consulté le: juin 08, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13702:ed-1:v1:fr:sec:A>
- [15] « BS EN 13237:2003 - Potentially explosive atmospheres. Terms and definitions for equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres ». Consulté le: juin 08, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030099680>
- [16] « IEC 60079-0 - Classification of explosion hazard areas ».
- [17] « NF EN 1127-1 : Atmosphères explosives ». Consulté le: juin 09, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://shop.snv.ch/Norme/Protection-contre-l-explosion/NF-EN-1127-1/NF-S66-500-1.html>
- [18] « IEC 60079-29-2:2015 ». Consulté le: juin 09, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://webstore.iec.ch/publication/21961>
- [19] D. Véronique, K. Sabine, L. Nicolas, et B. Sébastien, «  $\Omega$  22 - Principes et techniques pour la détection des gaz », INERIS, N° INERIS-DRA-08-86244-13727B.
- [20] « IEC 60079-4:1975 ». Consulté le: juin 09, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://webstore.iec.ch/publication/12954>

- [21] « Catastrophe de Feyzin », *La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques*. [https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/fiche\\_detaillee/1-2/](https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/fiche_detaillee/1-2/) (consulté le juin 08, 2021).
- [22] L. S, « Influence des enseignements tirés d'accidents impliquant des stockages de GPL dans l'évolution des guides de bonnes pratiques à l'étranger », N° DRA-08-85166-00650B. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/benchmark-gpl-web.pdf>
- [23] « Explosion dans un complexe de gaz liquéfié. », *La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques*. <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/26252/> (consulté le juin 08, 2021).
- [24] S. O et B. E, «  $\Omega 7$  - Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle », INERIS, mai 2003.
- [25] « Sécurité des systèmes - analyse de risques, Méthodes d'analyse de risques ». IFP Énergies nouvelles (French Institute of Petroleum), 2005.
- [26] H. BENDJELIDA, « Gestion des risques liés au milieu de forage par l'élaboration d'un rapport d'investigation sur l'incident de chute d'une source radioactive dans un puits », Projet de fin d'étude Master SIE, IMSI, Université Oran 2 Mohamed ben Ahmed, Oran, 2019.
- [27] F. M, « Bilan des méthodes d'analyse a priori de risques. 2 - Principales méthodes de la sécurité des systèmes. » INRS.
- [28] M. ROYER, « HAZOP : une méthode d'analyse des risques - Présentation et contexte : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur ». <https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/methodes-d-analyse-des-risques-42155210/hazop-une-methode-d-analyse-des-risques-se4030/> (consulté le mai 18, 2021).
- [29] J.-P. DAL PONT, « L'entreprise industrielle : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur ». <https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/base-documentaire/genie-industriel-th6/outils-et-techniques-au-service-des-fonctions-de-l-entreprise-42130210/l-entreprise-industrielle-ag10/> (consulté le mai 18, 2021).
- [30] « IEC 61882:2016 - Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide ». Consulté le: mai 18, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/a77032db-bbf0-4270-9eb3-4ee5863317ee/iec-61882-2016>

- [31] C. J.C, «  $\Omega$  12 - Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul) | Ineris », INERIS. Consulté le: mai 21, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ineris.fr/fr/omega-12-dispersion-atmospherique-mecanismes-outils-calcul>
- [32] N. Pandya, « Analyse de sensibilité paramétrique d'un outil de modélisation des conséquences de scénarios d'accidents. Application à la dispersion atmosphérique de rejets avec le logiciel Phast », phd, 2009. Consulté le: mai 20, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001056/>
- [33] « Modélisation des transferts atmosphériques de polluants : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur ». <https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/reglementation-et-analyse-de-l-air-42436210/modelisation-des-transferts-atmospheriques-de-polluants-in65/> (consulté le mai 20, 2021).
- [34] BOUDJELLA Abdelkader, « Etude de la Dispersion des Polluants Gazeux sur l'Ouest de la Méditerranée », Phd, Université USTO, Oran, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.univ-usto.dz>
- [35] N. Diaf, B. Mimi, M. Laarej, et B. Benyoucef, « Paramètres influençant la dispersion des polluants gazeux », p. 139-142, janv. 2003.
- [36] « Manuel Opérateur ; Process : Volume I et II (GP1/Z). »
- [37] « Soft représentation du complexe (GP1/Z). »
- [38] A. BOUSEHABA et H. MANSOURI, « Evaluation de l'efficacité du système détection feu et gaz « cas sphères stockages produit fini -GP1Z- » », IAP Arzew, Oran, 2018.
- [39] A. Tayeb, « Audit environnemental de la région d'Arzew - Wilaya d'Oran », université Oran 1, Oran, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.univ-oran1.dz/document/12201626t.pdf>

# Annexes

**Annexe 1 : Les équipement mis en place dans la zone:**

*a. Liste des soupapes de sécurité :*

**Tableau 1. 1:** Liste des soupape de sécurité

Repère	Service	Fluide	Dimension	Décharge Vers	tarage Pression de	Tonne/heure calcul Débit de
SV-0151 A/B	Bac sphérique stockage de Produit (07-T-0024)	C3 & C4	4"x 6"	Torche HP	22	56,1
SV-0152 A/B	Bac sphérique stockage de Produit (07-T-0025)	C3 & C4	4"x 6"	Torche HP	22	56,1
SV-0153 A/B	Bac sphérique stockage de Produit (07-T-0026)	C3 & C4	4" x 6"	Torche HP	22	56,1
SV-0154 A/B	Bac sphérique stockage de Produit (07-T-0027)	C3 & C4	4" x 6"	Torche HP	22	56,1 '
SV-0155 A/B	Bac sphérique Pentane (07-T-0023)	C5	6" x 8"	Torche HP	M	36,9
SV-0157 A/B	Ligne de service gaz naturel à ligne de chargement de Pentane	Gaz Naturel	1" x 2"	Torche HP		36,9
SV-0158	Ligne de produit mélange Propane/Butane	Mélange	3/4"	Blow Down	40	
SV-0159	Ligne Produit Propane		3/4"	Blow Down	40	
SV-0160	Ligne Produit Butane		3/4"	Blow Down	40	
SV-0159	Ligne Produit Propane		3/4"	Blow Down	40	
SV-0160	Ligne Produit Butane		3/4"	Blow Down	40	

## Annexe 1 : Les équipement mis en place dans la zone

### b. Liste des alarmes de Niveau :

#### b.1. Alarmes de Niveau haut :

**Tableau 1. 2:** Liste d'alarme de niveau haut

Repère	Service	Point de consigne (mm)*
LAL-0151	Sphère N°24	8000
LAL-0153	Sphère N°25	8000
LAL-0155	Sphère N°26	8000
LAL-0157	Sphère N°27	8000

\* hauteur à partir du fond

#### b.2. Alarmes de Niveau Bas :

**Tableau 1. 3:** Liste d'alarme de niveau Bas

Repère N°.	Service	Point de Consigne (mm)
LAL-0151	Sphère N°24	500
LAL-0153	Sphère N°25	500
LAL-0155	Sphère N°26	500
LAL-0157	Sphère N°27	500

### c. Liste des alarmes de pression :

#### c.1. Alarmes de pression haute :

**Tableau 1. 4:** Liste d'alarme de pression haute

Repère N°.	Service	Point de consigne (kg/cm <sup>2</sup> eff)
PAH-0152	Sphère N°24	19
PAH-0155	Sphère N°25	19
PAH-0158	Sphère N°26	19
PAH-0160	Sphère N°27	19

#### c.2. Alarmes de pression basse :

**Tableau 1. 5:** Liste d'alarmes d pression niveau bas

Repère N°	Service	Point de consigne (kg/cm <sup>2</sup> eff)
PAL-0153	Sphère N° 24	0,0
PAL-0156	Sphère N° 25	0,4
PAL-0159	Sphère N° 26	0,4
PAL-0161	Sphère N° 27	0,4

*d. Liste des déclencheurs de sécurité sur les sphères de Stockage Produit fini :*

**Tableau 1. 6: Arrêt d'urgence**

<b>Arrêt d'urgence</b>	<b>Point de consigne (mm)</b>	<b>Action automatique par signal d'arrêt</b>
Niveau Liquide Haut LSHH-0162	8 200	Fermer 07-T-0025 Soupape Admission HV-0154
Niveau Liquide Haut LSHH-0163	8 200	Fermer 07-T-0026 Soupape Admission HV-0156
Niveau Liquide Haut LSHH-0164	8 200	Fermer 07-T-0027 Soupape Admission HV-0158
Niveau Liquide Haut LSHH-0165	8 200	Fermer 07-T-0023 Soupape Admission HV-0160

**Tableau 1. 7: Liste des vanne d'arrêt d'urgence HV**

<b>Vanne</b>	<b>Service</b>	<b>Numéro «de vanne »</b>
HS-0151A/B	Sortie GPL sphère n° 24	HV-0151
HS-0152 A/B	Entrée GPL sphère n° 24	HV-0152
HS-0153 A/B	Sortie GPL sphère n° 25	HV-0153
HS-0154A/B	Entrée GPL sphère n° 25	HV-0154
HS-0155 A/B	Sortie GPL sphère n° 26	HV-0155
HS-0156 A/B	Entrée GPL sphère n° 26	H V-0156
HS-0157 57 A/B	Sortie GPL sphère n° 27	HV-0157
HS-0158 58 A/B	Entrée GPL sphère n° 27	HV-0158

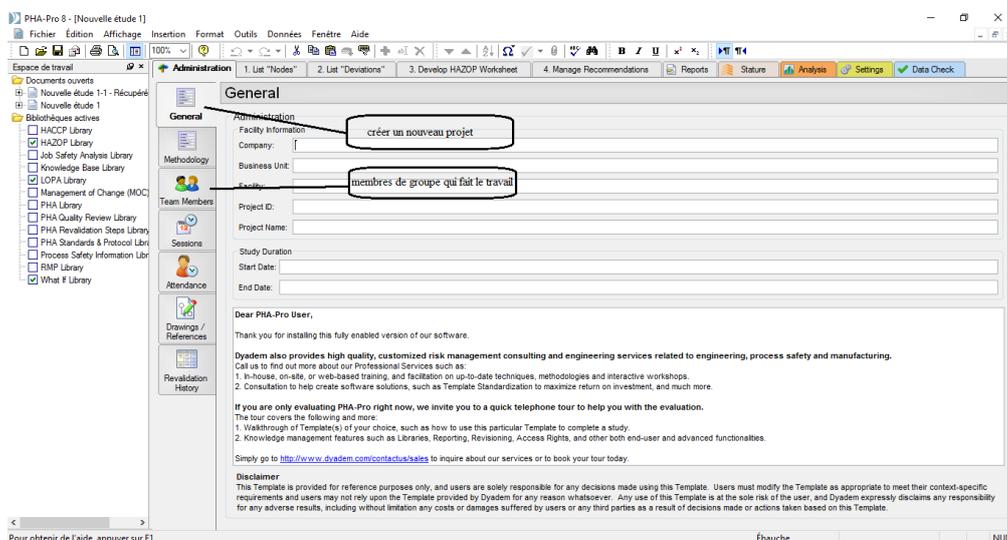
## Annexe 2 : Présentation de logiciel PHA-Pro :

PHA-Pro®, l'outil logiciel le plus complet et le plus innovant pour effectuer une analyse des risques de processus. Il fournit des conseils d'experts pour étudier une gamme complète de produits afin d'aider les entreprises à identifier les problèmes potentiels afin de les éliminer, ou du moins de réduire leur probabilité de se produire et de minimiser leurs effets nocifs.

### Avantage :

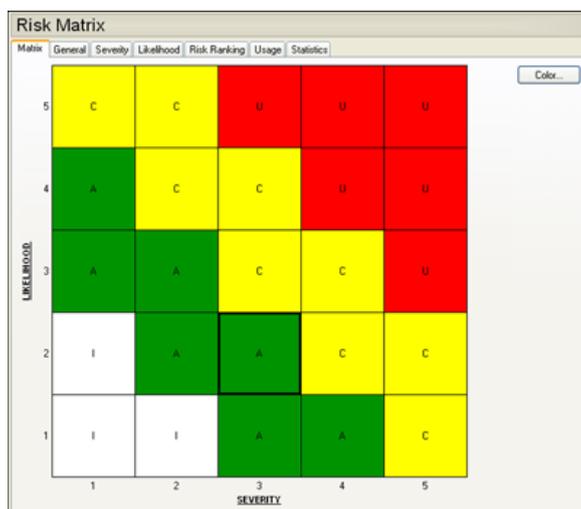
- Activer le classement automatique et visuel des risques ;
- Assurer la cohérence à travers les scénarios et les revues ;
- Créer un pont entre HAZOP/SIL, HAZOP/LOPA, HAZOP-SIL/Alarm Management pour permettre un pré-remplissage automatique avant chaque examen.

### Quelque étape de la simulation :



### ❖ Ajout de la matrice des risques

Une fois que vous avez créé votre hiérarchie, vous pouvez ajouter les paramètres de risque.



# Annexe 2 : Présentation de logiciel PHA-Pro

The screenshot displays the PHA-Pro software interface. At the top, there is a menu bar (Insertion, Format, Outils, Données, Fenêtre, Aide) and a toolbar. Below that, a navigation pane shows tabs for 'Administration', '1. List "Nodes"', '2. List "Deviations"', '3. Develop HAZOP Worksheet', '4. Manage Recommendations', 'Reports', 'Stature', 'Analysis', 'Settings', and 'Data Check'. The main workspace shows a HAZOP worksheet for a node: '1. Ligne de chargement et déchargement de sphères'. The deviation is '9. Basse niveau moins de GPL dans la sphère'. Below this, there are fields for 'Design Conditions/Parameters' and 'Drawings / References: Equipment ID:'. The central part of the interface is a table with the following structure:

Cause	Conséquence	Before Risk Reduction			Effective Safeguards	Recommendations
		S	L	RR		
1. - Défaillance des capteurs de niveau en indiquant un haut niveau dans la sphère d'où la fermeture des vannes - Fuite au niveau de la conduite ou le réservoir	1. - Vidange totale de la sphère et risque de cavitation et d'endommagement des pompes d'export - Diminution de la production et du rendement de l'installation - Dispersion du fluide puis une dépression Feu de nappe - Dommages environnemental	2	4	8	1. - Sécurités de niveau très bas qui arrêtent la pompe et ferment la vanne SDV	

Below the table, there is a list of causes with checkboxes, including: 'Débit élevé en provenance de l'unité précédente', 'défaillance de capteur de niveau', 'Défaillance des soupapes de sécurité - Défaillance de la pompe d'exportation', 'Défaillance des capteurs de niveau en indiquant un haut niveau dans la sphère d'où la fermeture des vannes', 'Fuite au niveau de la conduite ou le réservoir', 'Faible ou non écoulement de la source', 'Fuite au niveau de canal', 'Fermeture intempestive de la 33 SDV 00001 ou de la 33 MOV 00002 2', 'Arrêt des pompes d'export', and 'Défaillance (fermeture) de la 33 LV 00001'. A 'Fermer' button is at the bottom right of this list.

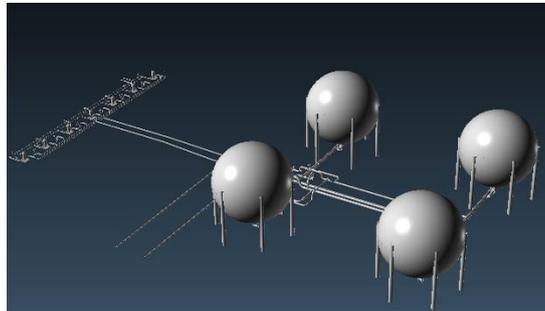
Three callout boxes are present: 'Ajout des colonnes' points to the 'S' and 'L' columns; 'Évaluation de la gravité et de la probabilité d'une conséquence' points to the 'RR' column; and 'Saisie de données' points to the 'Effective Safeguards' column.

### Annexe 3 : Présentation du logiciel Insight Numerics Flux :

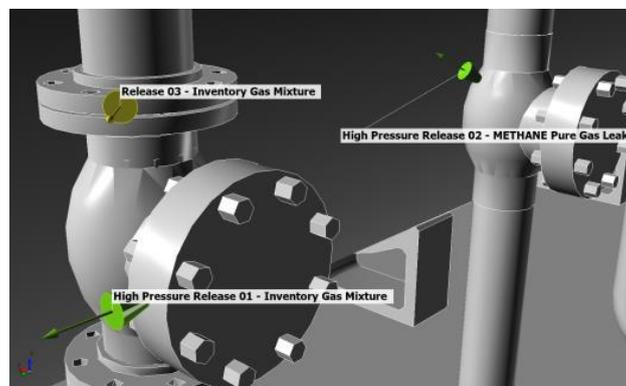
in:Flux est un logiciel CFD automatisé et intuitif à utiliser pour les études de dispersion et de ventilation. Il est entièrement développé par Insight Numerics.

▪ Les bases de donnée utilisé dans in:Flux requises sont :

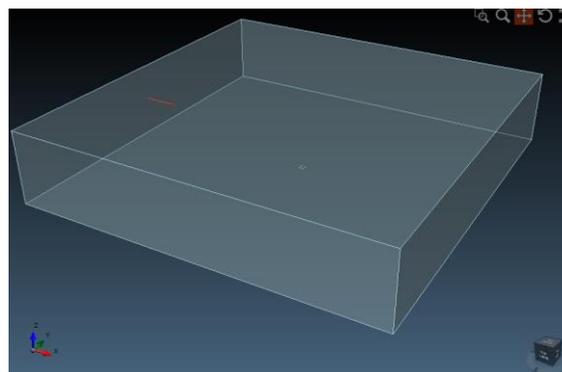
- 1) Fichier CAO 1.3D



- 2) Connaissance des conditions de processus (pression, température, inventaire) et des emplacements de fuite requis.



- 3) Connaissance des conditions atmosphériques du site, telles que la direction et la vitesse du vent



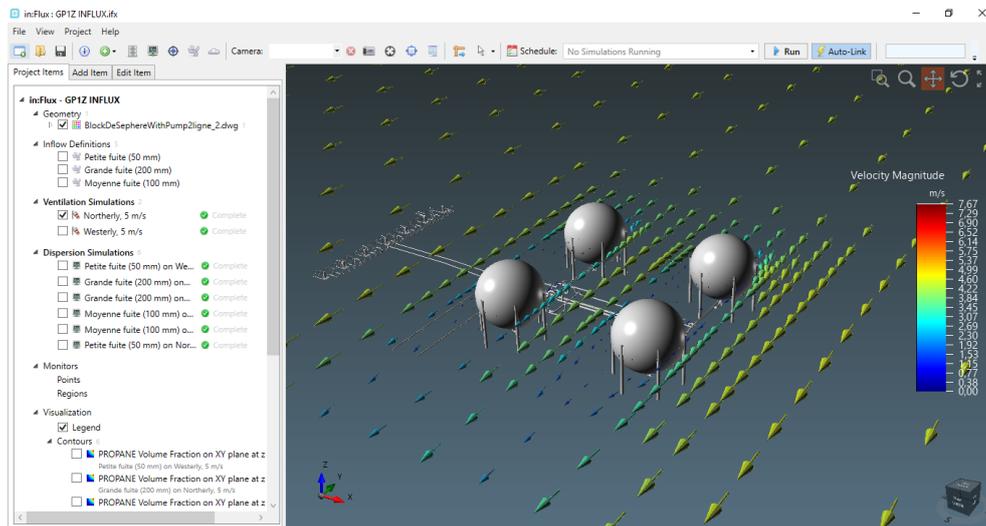
▪ Toutes les entrées utilisateur ci-dessus sont généralement requises pour les projets CFD, même si le projet est sous-traité.

### ▪ Dimensionnement automatique du domaine :

Une fois le CAD chargée dans le logiciel, les simulations de ventilation peuvent être définies simplement en choisissant une direction et une vitesse du vent.

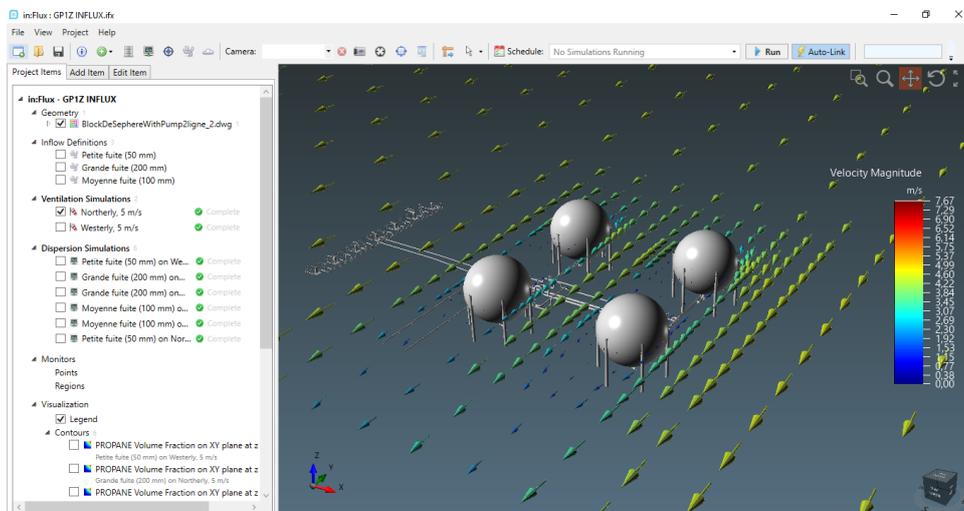
### ▪ Exécution d'une simulation de ventilation :

La simulation démarre automatiquement, aucune configuration supplémentaire n'est nécessaire. Les résidus et le débit peuvent être surveillés au fur et à mesure que la simulation progresse.



### ▪ Post-traitement : contours

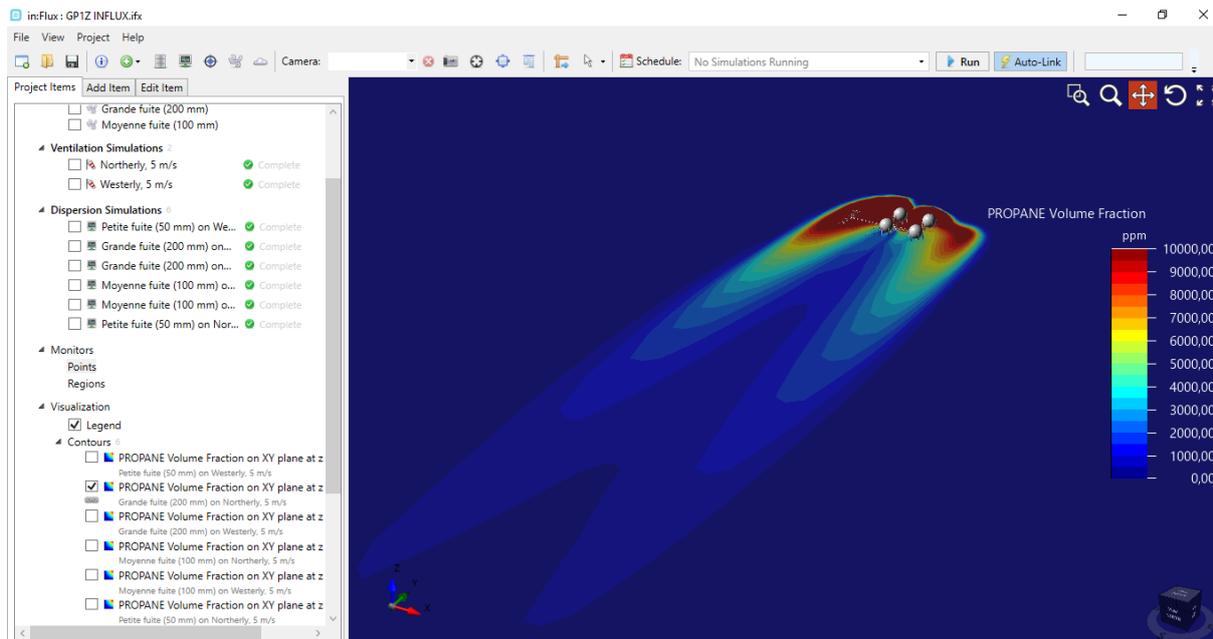
Une fois la simulation terminée, diverses options de post-traitement sont disponibles, notamment les contours :



### ▪ Exécution d'une simulation de dispersion

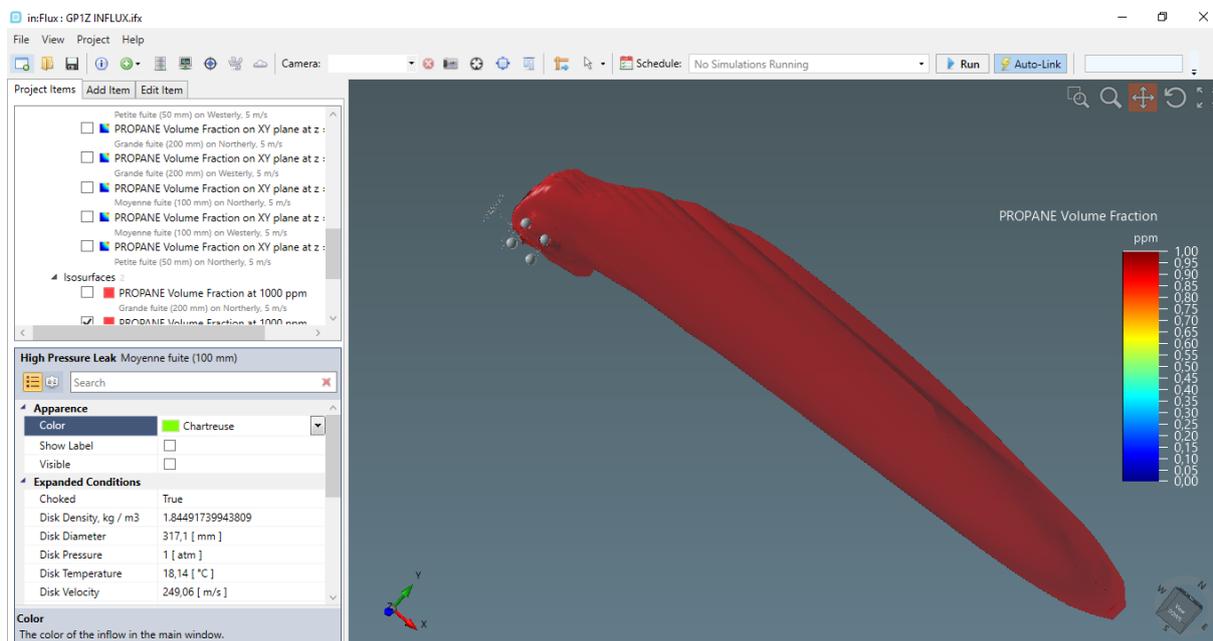
Une simulation de dispersion est définie simplement comme une combinaison d'une source de fuite et d'une simulation de vent. Aucune autre configuration n'est requise.

## Annexe 3 : Présentation de logiciel In:FLUX



Post-traitement : Isosurfaces :

Les isosurfaces sont utiles pour montrer les nuages de gaz dispersés. Celles-ci peuvent être configurées comme des concentrations de %volume, ppm, %LIE...



## **Annexe 4 : présentation de logiciel PHAST**

### **Présentation du logiciel DNV PHAST**

PHAST (Safeti Process Hazard Analysis Software) est un logiciel qui a été développé et mis à jour par DNV pour évaluer les conséquences des fuites de gaz, des incendies, des explosions, de la toxicité et des autres dangers technologiques reliés à diverses industries.

### **Description de l'outil PHAST**

Le logiciel PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool), est un outil d'analyse des risques d'une installation industrielle. PHAST simule l'évolution d'un rejet accidentel d'un produit toxique et/ou inflammable, depuis la fuite initiale jusqu'à la dispersion atmosphérique en champ lointain, incluant la modélisation de l'épandage et de l'évaporation de flaque.

### **Modélisation par le logiciel PHAST**

La modélisation des effets d'un phénomène accidentel comprend trois composantes, à savoir les modélisations du « terme source », de la « propagation » de cette source dans l'environnement et l'effet sur les « cibles ».

La dispersion atmosphérique d'un produit rejeté accidentellement dépend essentiellement :

- Des caractéristiques de la source d'émission (énergie cinétique, direction du rejet, densité du produit rejeté, durée de la fuite, conditions de la fuite...).
- Des conditions météorologiques comme la vitesse du vent, la stabilité de l'atmosphère, l'hygrométrie, la température ambiante.
- Des conditions de relief et de la présence d'obstacles.

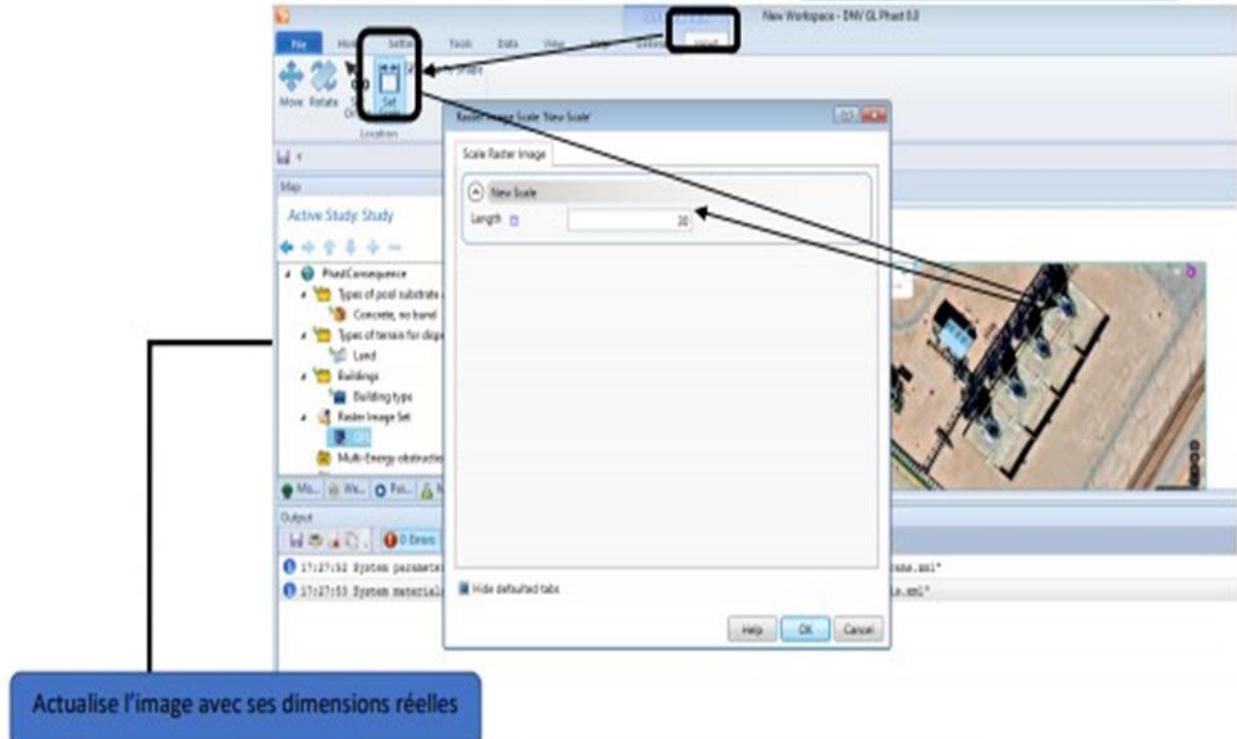
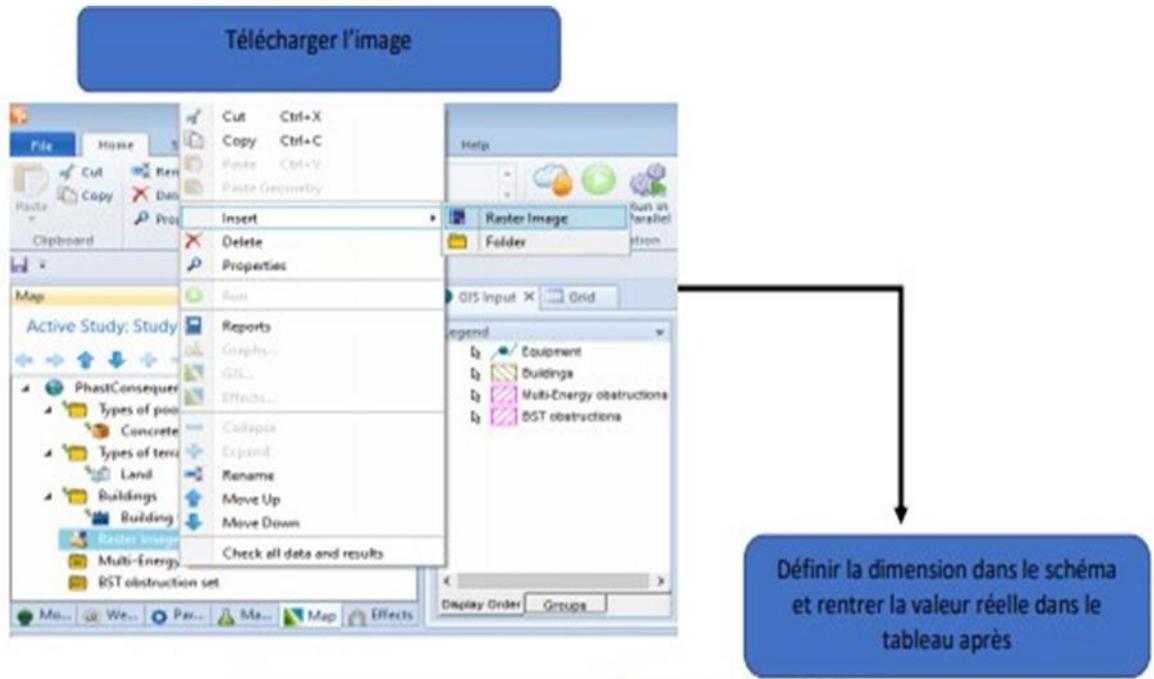
Le logiciel, commercialisé par DNV Software, est largement utilisé dans l'industrie pour l'estimation des conséquences d'accidents. Il permet de modéliser les phénomènes suivants : Feu chalumeau (jet fire), Feu de flaque (nappe), Feu nuage (feu flash), Boule de feu (BLEVE), des Explosions

### **Avantage de logiciel PHAST**

- Déterminer le niveau de risque
- Modélisation des conséquences des incidents
- Améliore la compréhension des dangers potentiels par les ingénieurs.
- Il fournit des résultats fiables avec très bonne précision
- Les mises à jour régulières du logiciel incorporent les expériences et l'expertise les plus récentes dans l'industrie
- Il permet d'obtenir une réponse rapide en cas d'incidents à risques

**Les industries utilisant actuellement PHAST**

- Pétrole et gaz.
- Universités.
- Fabricants de produits chimiques.
- Gouvernements et autorités chargées de la réglementation.
- Services de conseil et de conception.
- Compagnies



## Annexe 4 : Présentation de logiciel PHAST

